

ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE BUQUES EN EL PUERTO DE BARRANQUILLA

DAVID ARMANDO PRIETO MONTAÑEZ



UNIVERSIDAD DEL NORTE

PROGRAMA DE MAESTRÍA DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BARRANQUILLA - COLOMBIA

2019

ESTIMACIÓN DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE BUQUES EN EL PUERTO DE BARRANQUILLA

DAVID ARMANDO PRIETO MONTAÑEZ

Proyecto de Grado para optar al título de Magister en Ingeniería Ambiental

DAYANA MILENA AGUDELO CASTAÑEDA, PhD
(Directora)

Maestría en Ingeniería Ambiental
Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental
Universidad del Norte
2019

NOTA DE ACEPTACIÓN

JURADO 1

FIRMA

JURADO 2

FIRMA

Dedicatoria

*A mi familia, por confiar siempre en mí, por su apoyo incondicional y por ser la
motivación de mi vida.*

*A mis amigos, por su verdadera amistad y por brindarme palabras de aliento en los
momentos difíciles.*

Agradecimientos

A mi directora de proyecto, la Doctora Dayana Milena Agudelo Castañeda, por su guía y apoyo durante la elaboración de este proyecto.

A la Universidad del Norte, por abrirme las puertas para emprender este reto de crecimiento personal y profesional.

A los Doctores, Carlos Alberto Pacheco Bustos, Dayana Milena Agudelo Castañeda, Aymer Yeferson Maturana Córdoba y Andrés Fernando Guzmán Guerrero, por su excelente labor como docentes y guías en mi formación académica. Gracias por sus buenos consejos y por la exigencia constante, enfocada siempre a la formación de profesionales de alta calidad.

A mis compañeros y colegas, Alessandra Franco, Ricardo Mejía y Antonio Pineda, con quienes tuve la oportunidad de compartir y cursar los semestres de la maestría.

A mis compañeros de la Aduana de Barranquilla, por su confianza, respaldo, colaboración en la búsqueda de información y motivación constante en esta etapa.

Resumen

En los últimos años se ha identificado la actividad marítima como una fuente importante de emisión de contaminantes atmosféricos, de los que se ha comprobado el alto impacto sobre el medio ambiente y la salud humana, principalmente en las ciudades portuarias. En este sentido, resulta preocupante la falta de estos estudios en el territorio colombiano, más aún cuando este no dispone de mecanismos de control a causa de una nula legislación en materia de emisiones ambientales para estas fuentes. Tal que, de paso a la construcción de una línea base y se planteen medidas de control y otras recomendaciones, en el presente proyecto se utilizó la metodología “Bottom up” para la estimación de: SO₂, NO_x, Material Particulado (PM₁₀, PM_{2,5}), Hidrocarburos (HC), Compuestos Orgánicos Volátiles (VOC), CO, CO₂, CH₄, y N₂O, para las embarcaciones tipo Container, Granel y General arribadas al Terminal Fluvial de Barranquilla para el año 2018.

De este se determinaron como emisiones totales: 4583,18 ton de NO_x, 1417,34 ton de SO₂, 182,52 ton de PM₁₀, 179,42 ton de PM_{2,5}, 87,10 ton de HC, 155,84 ton de Compuestos Orgánicos Volátiles Diferentes a Metano (MN VOC), 136, 19 ton de CO, 105 677,85 ton de CO₂, 0,77 ton de CH₄ y 4,95 ton de N₂O. Siendo los NO_x los de mayor emisión para contaminantes primarios y CO₂ para los gases de efecto invernadero, donde el tipo Container fue la categoría que más contribuyó en dichas emisiones en términos generales. Así mismo, se determinó que la actividad en la que se generan mayores emisiones correspondió a “Cruising” (Navegación). No obstante, esto es dependiente de los tiempos de “Hotelling” (Atrake), dado que para periodos prolongados se pueden tener escenarios en los que esta última etapa pasa a ser la más contaminante.

Se estableció que la situación del puerto no es crítica con respecto a otros estudiados. Sin embargo, sin la adopción de medidas de control de emisiones y gestión de operaciones en puerto, es una situación que puede empeorar de manera considerable. Es por esto que se recomienda que el Estado colombiano ratifique el Anexo VI de MARPOL, tal que se fije la legislación ambiental necesaria para las mencionadas medidas de control y gestión.

Abstract

In recent years, maritime activity has developed as an important source of emission of atmospheric pollutants, and it is expected that this situation will get worse in the coming years with commercial growth. In this sense, the lack of studies concerning this situation in the Colombian territory is alarming, even more so this does not have control mechanisms due to a lack of legislation on environmental emissions for this source. Such that, in passing to the construction of a baseline and consider control measures and other recommendations, in the present work the "Bottom-up" methodology was used for some pollutants estimation (SO_2 , NO_x , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, HC, VOC, CO, CO_2 , CH_4 , and N_2O) based on the type (Container, Bulk and General) at the Maritime and Fluvial Terminal of Barranquilla in 2018.

Total emissions were estimated: 4583.18 tons of NO_x , 1417.34 tons of SO_2 , 182.52 tons of PM_{10} , 179.42 tons of $\text{PM}_{2.5}$, 87.10 tons of HC, 155.84 tons of MNVOC, 136, 19 tons of CO, 105,677.85 tons of CO_2 , 0.77 tons of CH_4 and 4.95 tons of N_2O . NO_x is the highest emission for primary pollutants and CO_2 for greenhouse gases. Where the Container type is the category that most contributed to these emissions in general terms. Likewise, it was determined that the activity in which greater emissions were generated corresponded to Cruising. However, this is dependent on the Hoteling times, since for long periods there may be scenarios in which this last stage becomes the most polluting one.

It was established that the port situation is not critical based on other studies. However, without the adoption of emission control measures and management of port operations, this situation can get considerably worse. That is why it is recommended that the Colombian State ratify MARPOL Annex VI so that the necessary environmental legislation for the aforementioned control and management measures could be established.

1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema.....	3
3. Justificación	5
4. Objetivos	6
5. Marco Teórico.....	7
5.1. Otros términos:.....	9
6. Legislación.....	12
7. Estado del Arte.....	15
8. Metodología	21
8.1. Área de estudio:	21
8.2. Actividades y alcance del estudio	23
8.1. Método para la investigación y método de cálculo.....	26
8.2. Procedimiento de cálculo.....	34
9. Resultados	38
9.1. Emisiones.....	38
9.2. Comparación con otros puertos	47
9.3. Impactos potenciales:.....	51
9.4. Medidas de gestión para el control de la contaminación atmosférica en el puerto.....	55
10. Conclusiones	61
11. Recomendaciones	63
12. Bibliografía	65

Lista de tablas

Tabla 1. Emisiones máximas de NO _x para ECA.	13
Tabla 2. Contenido máximo de Azufre en combustibles.	14
Tabla 3. Resumen de los principales inventarios de emisiones de buques en el mundo.	17
Tabla 4. Coeficientes de regresión lineal (r) para estimación de potencias instaladas.	29
Tabla 5. Potencia instalada de calderas auxiliares.	29
Tabla 6. Factores de Carga.	29
Tabla 7. Tipo de Combustible por tipo de motonave.	31
Tabla 8. Tipo de motor en función de tipo de embarcación y arqueo bruto.	31
Tabla 9. Factores de emisión (g/kWh).	32
Tabla 10. Factores de ajustes para LF < 20% (adimensional).	32
Tabla 11. Equivalencia de contaminantes secundarios.	33
Tabla 12. Impactos ambientales potenciales de no tomarse medidas de control.	51

Lista de figuras

Figura 1. Emisiones globales de $PM_{2.5}$ procedentes del tráfico marítimo (2015).	19
Figura 2. Emisiones globales de SO_x procedentes del tráfico marítimo (2015).	20
Figura 3. Puerto de Barranquilla. Fuente: Puerto de Barranquilla, 2018.....	21
Figura 4. Puerto Marítimo y fluvial de la ciudad de Barranquilla..	22
Figura 5. Espacio de Cruising considerado para la estimación..	23
Figura 6. Espacio de Maniobra considerado para la estimación.....	24
Figura 7. Metodología “bottom-up” del proyecto.....	26
Figura 8. Motonave: X-PRESS TAJUMULCO.....	34
Figura 9. Número y tipo de motonaves que arribaron al TMFB (2018).	38
Figura 10. Número de motonaves -2018.....	39
Figura 11 a,b,c y d. Emisiones totales de contaminantes primarios y gases de tipo invernadero por tipo de motonave estimadas para 2018 en TMFB.	41
Figura 12. Emisiones mensuales de SO_2 y NO_x en función del número de embarcaciones arribadas.....	43
Figura 13. Emisiones mensuales de PM_{10} , $PM_{2.5}$ en función del número de embarcaciones arribadas.....	44
Figura 14. Emisiones mensuales de HC, MNVOC y CO en función del número de embarcaciones.....	44
Figura 15. Porcentaje de las emisiones por generador de energía (Compilado). ME: Motor principal, AE: Motor auxiliar y AB: Calderas	45
Figura 16. Porcentaje de emisiones en función de la Actividad de las embarcaciones.	46
Figura 17. Emisiones de NO_x y SO_2 de los puertos estudiados en función de las llamadas a Puerto	49
Figura 20. Emisiones de CO_2 de los puertos estudiados en función de las llamadas a puerto.	50

1. Introducción

Durante los últimos años, las emisiones de los buques han sido reconocidas por la comunidad científica como una fuente importante de contaminación en las ciudades portuarias, debido al impacto generado en la calidad del aire, los efectos en la salud humana y el clima global. Actualmente el 90% del comercio mundial se realiza a través de buques, lo que evidencia que la flota mercante que transita diariamente por los océanos del mundo es grande y con tendencia a aumentar, como consecuencia de la expansión del comercio marítimo internacional (Port et al., 2017).

Se estima que hay 450 diferentes especies contaminantes que afectan la calidad del aire, debido a los procesos de combustión interna en los motores de los barcos, siendo las emisiones de material particulado (MP), NO_x, SO₂, CO, CO₂, hidrocarburos (HC) y compuestos orgánicos volátiles (COV) las más importantes por los impactos generados en la salud y el medio ambiente (Alver, Saraç, & Alver Şahin, 2018). La exposición a la contaminación del aire, es considerada por la organización mundial de la salud como el mayor riesgo de salud ambiental, causando 1 de cada 8 muertes mundiales o el equivalente a 7 millones de muertes al año (OMS, 2014).

A diferencia de las políticas y reglamentaciones implementadas para la prevención y control de las emisiones de los vehículos de carretera, el control de las emisiones de los buques sigue siendo insuficiente (Chen et al., 2017) y la eliminación de emisiones exige una regulación más efectiva. En respuesta, la organización marítima internacional (OMI), ha abordado el tema de la contaminación de los buques en virtud de la convención MARPOL Anexo VI, adoptando regulaciones específicas para reducir las emisiones de nombre SO_x, NO_x e indirectamente MP en áreas específicas de todo el mundo, denominadas áreas de control de emisiones –ECA (Environmental Control Areas) (Tichavska, Tovar, Gritsenko, Johansson, & Jalkanen, 2017).

Los inventarios de emisiones de escape de los buques pueden estimarse aplicando metodologías basadas en el tipo de combustible o en la actividad (velocidades reales,

tiempos de operación, distancia de viaje entre otros) (Nunes, Alvim-Ferraz, Martins, & Sousa, 2017). Este proyecto busca estimar las emisiones generadas por los buques que arriban al puerto de Barranquilla, a través de la metodología bottom-up, con el fin de analizar el impacto en la atmósfera, de manera que se puedan proponer alternativas o medidas de gestión, que permitan reducir los impactos generados por la contaminación del aire, como resultado de las actividades de los buques.

2. Planteamiento del problema.

A través de varios estudios, se ha demostrado que las emisiones de los buques son una fuente de contaminación atmosférica en las ciudades costeras y las regiones fluviales, afectando negativamente la calidad del aire regional, contribuyendo al fenómeno de cambio climático y exponiendo a los residentes de comunidades vecinas en mayor riesgo a impactos de salud (Yau et al., 2012; Zhao et al., 2013).

Barranquilla, al ser Distrito Especial, Industrial y Portuario, no se escapa de esta realidad, debido a que es una ciudad en la que se desarrollan varias actividades de comercio exterior, a través de la importación y exportación de mercancías (Alcaldía Distrital de Barranquilla, 2018). Como consecuencia, recibe las emisiones generadas por los buques, que son producidas por sus motores (Principales y Auxiliares), cuando maniobran dentro y fuera del puerto, y cuando permanecen atracados. Por lo tanto, los contaminantes de escape de los barcos son una amenaza significativa para el medio ambiente y la población (Chengpeng, Di, Xinping, & Zaili, 2017; Moore et al., 2018; Nunes et al., 2017b; Wang & Chen, 2017).

Infortunadamente, Colombia carece de regulaciones ambientales en lo referente a las emisiones de transporte marítimo, por la ausencia de estudios, la falta de instrumentos accesibles y de metodologías que permitan evaluar la exposición cerca de la fuente, que conduzca a la identificación de los impactos que afectan la calidad del aire de las zonas costeras. Asimismo, en el país no existen zonas de control de emisiones.

Ante esta ausencia, se hace necesario abordar el tema a través de la investigación por parte de la comunidad académica y científica, con el fin, que se pueda despertar un mayor interés en las autoridades ambientales, para diseñar e implementar herramientas de gestión, que permitan ejercer controles más estrictos de las emisiones generadas por los buques. Teniendo en cuenta lo ya mencionado, con el siguiente trabajo se quiere responder a las siguientes preguntas de investigación: ¿En cuánto se estiman anualmente las emisiones

atmosféricas para los contaminantes estudiados¹ de los buques que llegan al puerto de Barranquilla? ¿Cuáles son las metodologías de estimación disponibles y cuál la más apropiada? ¿Cómo se comparan estas emisiones con las registradas en otros puertos ya estudiados? y, ¿Cuáles son los efectos que se podrían esperar en la calidad de aire por cuenta de estas emisiones?

¹ SO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2,5}, HC, VOC, CO, CO₂, CH₄, y N₂O

3. Justificación

Se ha venido abordando el tema de los buques como fuentes de emisión de contaminantes atmosféricos, con un aporte significativo en la calidad del aire de las zonas circundantes y que además no existe ningún tipo de legislación a nivel nacional que controle o limite la cantidad de dichas emisiones.

Así, la ejecución del presente proyecto se ve justificada por:

- Se requiere generar información cuantitativa que permita realizar un diagnóstico preliminar de la situación actual del puerto de Barranquilla con respecto a las emisiones atmosféricas proveniente de los buques.
- Es necesario determinar, al menos teóricamente, cuáles serían los efectos derivados de los contaminantes atmosféricos emitidos por los buques estudiados en el puerto de Barranquilla.
- Es relevante evidenciar la problemática que representa el puerto de Barranquilla como un foco potencial de emisiones atmosféricas y sus efectos en la salud para la ciudad y la región en general.
- Preocuparse por la sostenibilidad y el impacto ambiental-social que puede generar el transporte de productos por medios fluvial y marítimo.
- Crear estrategias para mitigar las emisiones y los impactos negativos que estos generan.

4. Objetivos

Objetivo general:

Estimar las emisiones de los contaminantes atmosféricos de estudio, generados por las actividades de los buques que arriban a la Sociedad Portuaria del Distrito Especial, Industrial y Portuario de Barranquilla, a través de la metodología Bottom-up.

Objetivos específicos:

- Determinar, de acuerdo a su clasificación, cuáles son los tipos de buque que más contribuyen en las emisiones de los contaminantes atmosféricos.
- Conocer, cuáles de los contaminantes atmosféricos de estudio, son emitidos en mayor concentración, producto de la actividad de los buques que llegan al puerto de Barranquilla.
- Identificar los impactos potenciales producto de las actividades de buques en el puerto de Barranquilla.
- Proponer medidas de gestión para el control de la contaminación atmosférica que permitan reducir los impactos ambientales generados como resultado de las actividades desarrolladas por los buques.

5. Marco Teórico

Los puertos marítimos pueden ser fuentes importantes de contaminación, ya que son grandes centros de actividad económica que operan continuamente durante todo el año. Entre las numerosas fuentes diarias de emisión se tienen los barcos (que generalmente utilizan combustibles de mala calidad), los camiones que transportan mercancías desde y hacia los puertos y demás actividades indirectas asociadas a los puertos. (Baumgardner et al., 2017). Las emisiones generadas por los buques se pueden clasificar en dos grupos de acuerdo al impacto que causan. El primero, son las emisiones que generan contaminación al aire, mientras que el segundo, son las emisiones que contribuyen al fenómeno del cambio climático. El primer grupo incluye SO_x , NO_x , Material particulado (MP), CO y compuestos orgánicos volátiles distintos del Metano (MNCOV), y el segundo abarca CO_2 , Hidroclorofluorocarburos (HCFC) y CH_4 . Por otro lado, las emisiones también se pueden clasificar en contaminantes atmosféricos primarios y secundarios, teniendo en cuenta el impacto que generan en la salud humana. Los primarios son aquellos que tienen efectos inmediatos cerca a la fuente de emisión (efectos locales). Los contaminantes secundarios se generan cuando las emisiones se transforman en la atmósfera a través de reacciones químicas para producir otros contaminantes, y pueden tener lugar muy lejos del área de emisión (Chatzinikolaou, Oikonomou, & Ventikos, 2015).

Las emisiones de los buques son producidas por los motores de los barcos (principal (ME: Por sus siglas en inglés “Main Engine”) y auxiliar (AE: Por sus siglas en inglés “Auxiliary Engine”)) cuando están navegando, maniobrando dentro y fuera del puerto y quedándose en el muelle. Siendo el motor principal el responsable de generar la energía que se transformará en la fuerza de empuje y el motor auxiliar para los diferentes servicios de la tripulación. Además, muchas embarcaciones cuentan con sistemas de calderas para dar soporte a los mencionados servicios, donde las emisiones de estas, son las menos significativas y dependen en gran medida de su tamaño y el alcance de su uso (Alver, Ayhan, & Alver, 2018; Styhre, Winnes, Black, Lee, & Le-griffin, 2017; Wang & Chen, 2017).

De acuerdo a su capacidad y estructura, entre otros enfoques, se puede hacer una clasificación de las embarcaciones. En general, en los estudios de estimación de emisiones se suelen clasificar en siete categorías principales: i) granelero; ii) contenedor; iii) carga general; iv) pasajero; v) carga Ro-Ro; vi) cisterna; y vii) otros (Alver et al., 2018).

Las emisiones generadas por los buques son una amenaza para el medio ambiente, especialmente en las ciudades costeras, por lo tanto, se hace necesario desarrollar estrategias de gestión y control de la contaminación, que permitan garantizar la calidad del aire de la región, sin embargo, hacer la caracterización de las emisiones es particularmente difícil debido a las múltiples tareas desarrolladas dentro de las instalaciones. Para ello, se deben tener en cuenta dos requisitos: 1. Establecer un inventario preciso de emisiones de los buques y 2. Cuantificar la contribución de las emisiones de los barcos que afectan la calidad del aire (Chen et al., 2017).

Los dos métodos principales para realizar inventarios de emisiones de barcos se pueden clasificar como enfoques basados en el combustible (arriba hacia abajo o “top-down”) y basados en la actividad (abajo hacia arriba o “bottom-up”). La primera metodología se basa en la combinación de datos sobre ventas de combustible marino (cantidades y tipos) y factores de emisión relacionados con el combustible (Sang-keun Song & Shon, 2014). El enfoque basado en el combustible es comúnmente utilizado por varios países para preparar inventarios nacionales e internacionales de emisiones. Este enfoque se utiliza cuando no es posible obtener información acertada del tráfico de embarcaciones, sin embargo, el método basado en la actividad debe preferirse porque los parámetros de entrada son más precisos. Para este último se requiere información detallada de las especificaciones del barco, datos de inspección y operativos, velocidad máxima, llamadas a puertos, operaciones de envío estimadas y operaciones en tiempo real (An, Vladimir, & Cho, 2018).

Además de estos métodos, se tienen otros modelos de estimación, como, por ejemplo: monitoreo móvil, en el que se puede hacer una caracterización de la contaminación atmosférica de las áreas cercanas a la fuente. Las fuentes de contaminación incluyen a los buques y las actividades propias de la logística desarrollada dentro de los puertos, como el

ingreso de camiones, uso de grúas, y montacargas (Steffens et al., 2017); Modelos basados en herramientas web tales como: C-FERST (Zartarian et al., 2011), EJSCREEN (Ministerio del Medio Ambiente estadounidense, 2016), C-línea (Barzyk et al., 2015) y C-PORT (Isakov et al., 2017), entre otros. Las entradas de estos modelos, incluyen emisiones e información meteorológica, tipo de buques y vehículos, y en muchos de los casos se pueden simular nuevas instalaciones, carreteras o líneas ferroviarias, que pueden ser añadidas para crear escenarios hipotéticos, con el objetivo de planificar un desarrollo sostenible a escala comunitaria. Asimismo, se tienen otras metodologías híbridas que consisten en la combinación de los diferentes enfoques de los modelos ya mencionados (An et al., 2018).

5.1. Otros términos:

- **Material particulado (MP):** Es el contaminante atmosférico más importante generado por los barcos, debido a las externalidades que genera en la salud humana. Las emisiones de MP, generalmente se dividen en $MP_{2.5}$ y MP_{10} , dependiendo del tamaño de partícula (diámetro) (Chatzinikolaou, Oikonomou, & Ventikos, 2015). Las partículas con un diámetro de 10 micrones o menos pueden penetrar y alojarse dentro de los pulmones, mientras que las partículas con un diámetro de 2,5 son aún más dañinas, ya que pueden penetrar la barrera pulmonar e ingresar al sistema sanguíneo, aumentando el riesgo de enfermedades cardíacas y respiratorias como el cáncer de pulmón (World Health Organisation WHO, 2018). Si bien, en general no representan el mayor contaminante emitido para la fuente estudiada, es el que mayor costo en externalidades genera (Chatzinikolaou et al., 2015).
- **Emisiones de nitrógeno:** Los Óxidos de Nitrógeno se representan como NO_x , y corresponden al Óxido Nítrico (NO) y el Dióxido de Nitrógeno (NO_2). Los NO_x se producen a partir de quema de biomasa, combustión de combustibles fósiles y en la estratosfera por la fotodegradación del óxido nitroso (Martínez, Fernández Bremauntz & Osnaya, 2005). La mayoría de NO se oxida rápidamente en la atmósfera a NO_2 y luego a ácido nítrico y otros nitratos. El NO se considera inofensivo ya que es un agente reductor y no oxidante, pero el NO_2 primario afecta

el sistema respiratorio. Estudios epidemiológicos han demostrado que la exposición prolongada al NO₂ posiblemente esté asociada con un aumento de los síntomas de bronquitis en niños asmáticos (European Environment Agency, 2013).

- **Emisiones de azufre:** La oxidación del SO₂ da lugar a la formación de la lluvia ácida (Holleman y Wiberg, 2001), causando daños sobre ríos, lagos, bosques y acidificación de los suelos. Las partículas de Sulfato que son contaminantes secundarios del SO₂ pueden ser transportadas largas distancias por los vientos e inhaladas profundamente en los pulmones de las personas, aumentando la enfermedad y la muerte prematura por trastornos cardíacos y pulmonares. El SO₂ como contaminante primario puede contribuir a problemas respiratorios, principalmente en niños y ancianos, y agravar enfermedades cardíacas y pulmonares existentes (Denisis, 2009).
- **Otros contaminantes emitidos por los buques:** Otros contaminantes emitidos por los barcos que tienen efectos sobre la salud, son el Monóxido de Carbono (CO), los compuestos orgánicos volátiles distintos del Metano (MN VOC) y el Ozono (O₃). El CO, puede causar impactos significativos, sin embargo, los costos de daños estimados son bajos, incluso para el sector del transporte (Rabl, 2001). Los MN VOC contienen hidrocarburos (HC), algunos de los cuales son cancerígenos. Otros componentes dañinos de los MN VOC son los hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP) que son mutágenos humanos y carcinógenos (Choi et al., 2006).
- **Operaciones de las embarcaciones:** Las operaciones de “Hotelling” correspondientes al cargue, descargue y/o estacionamiento; “Maniobra” el cual incluye generalmente las zonas de baja velocidad, la llegada y salida del muelle; y “Cruising” o a toda máquina en embarcaciones (Styhre et al., 2017; Tovar, Gritsenko, & Johansson, 2017).
- **Sistema de Identificación Automática (AIS: por sus siglas en inglés: “automatic identification system”):** Sistema de rastreo de embarcaciones, introducido por la Convención Internacional de la OMI sobre Seguridad de la Vida en el Mar (SOLAS), para mejorar la seguridad y la eficiencia de la navegación, la

seguridad de la vida en el mar y también para la protección del medio ambiente marítimo mediante una mejor identificación de los buques (An et al., 2018).

- **Tecnología “Cold-ironing”:** Es una tecnología que permite a los buques en fase de “Hotelling” usar una fuente de energía proveniente de las instalaciones del puerto en lugar de depender de la electricidad generada por sus motores auxiliares.

6. Legislación

La organización marítima internacional, que es el organismo regulador formal del sector marítimo, ha adoptado regulaciones específicas para reducir la contaminación atmosférica por MP (OMI 2015), óxidos de azufre y nitrógeno en áreas específicas alrededor del mundo, las llamadas áreas de control de emisiones (ECA: Por sus siglas en inglés “Emission Control Area”). Las zonas ECA establecidas hasta el momento son las siguientes: Zona del mar Báltico, definida en el Anexo I del convenio MARPOL (Solamente para SO_x); Zona del mar del Norte, definida en el anexo V del Convenio MARPOL (Solamente para SO_x); Zona Norteamérica, definida en el apéndice VII del Anexo VI del convenio MARPOL (SO_x, NO_x y MP); y finalmente la Zona del mar caribe de los Estados Unidos, definida en el Apéndice VII del Anexo VI del convenio MARPOL (SO_x, NO_x, y MP) (OMI, 2018).

A diferencia del control de emisiones cada vez más estricto de los vehículos de carretera, las políticas y regulaciones para la prevención y control de las emisiones de los buques siguen siendo insuficientes e inefectivas, por lo que muchas autoridades portuarias siguen ignorando la importancia del desarrollo sostenible (Cui & Notteboom, 2017; Port et al., 2017). El diseño de un marco regulatorio efectivo para la mejora de la calidad del aire, requiere de información más precisa sobre cómo y quién emite emisiones. Por esto, no solo se requiere de un cálculo exacto de las emisiones en función de los movimientos de los buques (posición, velocidad, configuración técnica y tipo operativo), sino que también se debe abordar la desagregación de los resultados (en función de las categorías de buques y subcategorías) (Ballini & Bozzo, 2015).

Los esfuerzos para reducir el impacto ambiental del transporte marítimo internacional no se han centrado tradicionalmente en el cambio climático, por lo que no ha sido un tema de conversación en las diferentes convenciones de cambio climático, sumado al hecho que parte significativa de las emisiones no ocurren dentro de los límites de ningún país específico. Los contaminantes locales como los NO_x y SO_x, dominan los riesgos ambientales, por lo que son el foco principal en la elaboración de normativas para el

transporte marítimo. Los principales temas para los impactos ambientales han sido, por ejemplo, el uso de toxinas en pinturas antiincrustantes; liberación en especies no autóctonas con agua de lastre; y ensuciamiento, ruido y emisiones de partículas y gases de combustión en el aire (principalmente SOx) (Nunes, Martins, & Sousa, 2017b; Steffens et al., 2017).

Como ya se mencionó, una de las acciones implementadas por la OMI fue el Convenio Internacional para la Prevención de la Contaminación por Buques (MARPOL). En 1997, el Anexo VI se agregó a MARPOL 73/78 para regular la contaminación del aire causada por los buques. En 2008, la OMI ha revisado la regulación del contenido de azufre del combustible marino (que figura en el Anexo VI de MARPOL). En el 2012 se realizaron cambios en dichos contenidos y fue implementado en Europa. Desde 2015, los barcos que navegan en las áreas de control de emisiones de SOx (SECA) no pueden usar combustibles con más del 0,1% en peso de contenido de azufre. En otras áreas, los barcos tuvieron que reducir el contenido de azufre de su combustible hasta un máximo del 3,5% en peso en 2012, buscando llegar al 0,5% en peso para el 2020. No obstante, si bien los valores límite de azufre se deben aplicar a toda la flota, los límites de emisión de NOx son solo aplicados en buques nuevos, dependiendo de la velocidad nominal del motor y el año de instalación. En consecuencia, el efecto de las regulaciones de la OMI con respecto a los NOx actuales y futuros será limitado (Nunes et al., 2017b; Sanabra, José, Santamaría, & Xavier, 2014).

Las normas de emisión de la organización marítima internacional (OMI) que abordan los NOx se conocen como Tier I-III, estas se presentan en la tabla 1, la cual está en función de las velocidades máximas de operación del motor.

Tabla 1. Emisiones máximas de NOx para ECA.

Estándar de Emisión	Fecha	Límite de NOx g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000–2010	17,0	45 n ^{-0,2}	9,8
Tier II	2011–2015	14,4	44 n ^{-0,23}	7,7
Tier III	2016-	3,4	9 n ^{-0,2}	1,96

*En donde n corresponde a la velocidad máxima de operación del motor (rpm).

Fuente: Modificado de Sanabra et al., 2014.

En la tabla 2 se presenta los contenidos de Azufre en el combustible que debe ser utilizado en puertos, ECA-s y a nivel global, en los que se tiene proyectado para el año 2020 los umbrales más exigentes.

Tabla 2. Contenido máximo de Azufre en combustibles.

Área	Periodo	Max. Contenido de Azufre*
Puerto	2010	0,10%
	2010 - 2015	1%
ECA-s	2015 -	0,10%
	- 2012	4,50%
Global	2012 - 2020	3,50%
	2020 -	0,50%

Fuente: Tomado de Sanabra et al., 2014.

*Porcentaje en peso.

El Anexo VI no establece como obligatoria la regulación de los Compuestos Orgánicos Volátiles (COV) y otros compuestos, sin embargo, un Estado podrá optar por regular emisiones provenientes de buques en puertos bajo su jurisdicción.

Para la protección de los océanos, el Estado colombiano creó la Dirección General Marítima (DIMAR), y de esta manera garantizar que se cumplan las normas de MARPOL aprobadas mediante la ley 12 de 1981. No obstante, solo se ratificaron los 5 primeros Anexos, quedando el Anexo VI (relativo a contaminación atmosférica por los buques) pendiente de ser ratificado.

7. Estado del Arte

En la actualidad la industria portuaria se enfrenta a muchos desafíos a nivel mundial, entre ellos: la necesidad de acomodar barcos cada vez más grandes; la competencia de los nuevos puertos; los cuellos de botella de transporte para el movimiento de mercancías, materias primas y gente entre la tierra y el mar; y más recientemente cuestiones ambientales como la contaminación del aire, la tierra y el agua por parte de los buques. Todo esto bajo presiones comerciales que exigen de estas seguir siendo viables, competitivas y rentables (Carpenter, Lozano, Sammalisto, & Astner, 2018). Si bien el transporte marítimo es el modo de transporte más respetuoso con el medio ambiente en términos de emisiones/consumo de combustible por tonelada de carga (Cui & Notteboom, 2017), contribuyen significativamente al deterioro ambiental. Se tiene evidencia que la contaminación a causa de las operaciones portuarias no solo dañará el equilibrio ecológico de la naturaleza y el entorno urbano, sino que también causará un efecto adverso en el cambio climático global, lo que aumenta aún más el riesgo asociado con las operaciones portuarias (Chengpeng, Di, Xinping, & Zaili, 2017; Moore et al., 2018; Nunes et al., 2017b; Wang & Chen, 2017).

Estudios recientes muestran que al menos el 70% de las emisiones de los buques en rutas internacionales se producen dentro de los 400 km de la costa, en donde se ha concluido que barcos en los puertos pueden llegar a contribuir alrededor del 55 al 77% de las emisiones totales en las áreas próximas al puerto (Alver et al., 2018; Moreno-gutiérrez et al., 2019; Nunes, Martins, & Sousa, 2017a; Nunes et al., 2017b; Steffens et al., 2017). Sin embargo, estos valores dependen de la ciudad de estudio, ya que si bien su efecto es significativo se tiene evidencia que el impacto de la industria terrestre es mucho mayor en ciudades con un alto desarrollo en la mencionada actividad (Chatzinikolaou et al., 2015).

Alrededor del 90% de las mercancías a nivel mundial son transportadas por medio marítimo (Alver et al., 2018; Nunes et al., 2017b), de lo que se estima contribuye aproximadamente con el 2,4% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero derivadas de fuentes antropogénicos. Se espera que su participación aumente en el futuro,

por lo que estas emisiones seguirán siendo una amenaza importante para el medio a largo plazo, especialmente para las ciudades costeras con grandes puertos (Port et al., 2017; Styhre et al., 2017).

En concreto para los principales contaminantes, las estimaciones muestran que los barcos liberan de 1.2 a 1.6 millones de toneladas de PM₁₀, de 4.7 a 6.5 millones de toneladas de SO_x y de 5 a 6.9 millones de toneladas de NO_x en todo el mundo (An et al., 2018; Nunes et al., 2017b). De esto, se ha determinado que los mayores costos asociados a externalidades se producen en el nivel local (Chatzinikolaou et al., 2015).

Con respecto al desarrollo del inventario de emisiones de barcos, se han realizado numerosos esfuerzos en todo el mundo para innovar el método tecnológico para una mejor precisión de estimación. Los inventarios solían usar comúnmente el método de "arriba hacia abajo" para calcular las emisiones basadas en los datos de consumo de combustible del barco, no obstante, este método se consideró menos preciso cuando se trata a escala regional (Port et al., 2017). En las últimas dos décadas, ha habido un número creciente de estudios publicados de estimación de emisiones marítimas. En donde el enfoque de "abajo hacia arriba" ha sido el más utilizado y es considerado por muchos autores como un método mucho más preciso y prometedor para estimar las emisiones del tráfico marítimo (An et al., 2018; Nunes et al., 2017b; Port et al., 2017).

En la tabla 3 se presenta un compilado de más de 60 puertos alrededor del globo cuya estimación de emisiones se realizó por medio del método "abajo hacia arriba". Es necesario agregar que esta revisión identifica algunos vacíos de investigación críticos, los cuales son necesarios para un mejor control de las emisiones de los buques y con esto reducir sus impactos ambientales.

En muchos de estos estudios como no fue posible obtener las potencias de los motores (no disponibles en AIS), se utilizaron valores predeterminados para obtener las potencias máximas de los motores principales (ME) y auxiliares (AE) y calderas auxiliares (AB) (Alver et al., 2018; An et al., 2018; Tovar et al., 2017).

Tabla 3. Resumen de los principales inventarios de emisiones de buques en el mundo.

Puerto (s)	Año	NOx	SOx	PM ₁₀	PM _{2.5}	HC	CO	CO ₂	Referencia
Grecia: 4 puertos	2013	1,888	0,761	ND	0,094	ND	ND	ND	(Maragkogianni, 2015)
Greece: 18 puertos	2013	2,488	0,995	ND	0,121	ND	ND	124,768*	(Papaefthimiou, 2016)
Portugal: 4 puertos	2014	29,500	13,700	1,500	ND	1,200	ND	ND	(Nunes et al., 2017)
España: Las Palmas	2011	4,237	1,420	ND	0,338	ND	0,497	208,697	(Tichavska, 2015)
India: Bombay	2006	4,200	1,400	0,300	ND	ND	ND	ND	(Joseph, 2009)
USA: Los Angeles	2005	6,206	5,609	0,634	ND	ND	ND	ND	(Reilly, 2005)
China: Yangshan	2006	10,758	5,623	1,078	0,859	0,519	1,136	578,444	(Su Song, 2014)
China: Tianjin	2014	41,300	29,300	4,030	3,720	1,720	3,570	1970,000	(Chen, 2016)
Korea: Busan	2006	11,677	4,759	0,367	ND	0,332	ND	ND	(Sang-keun Song, 2014)
	2008	10,989	9,561	1,240	ND	0,374	ND	561,132	
	2009	8,704	8,232	0,675	ND	350,000	ND	486,281	
Taiwan: Kaohsiung	2012	0,675	0,641	0,053	0,049	0,019	0,053	34,786	(Taylor & Cullinane, 2015)
Taiwan: Keelung	2012	0,198	0,188	0,016	0,14	0,006	0,016	10,189	
Taiwan: Taichung	2012	0,279	0,265	0,022	0,020	0,008	0,022	14,375	
Turquia: Golfo de Izmit	2005	5,356	4,305	0,487**	ND	0,232	ND	254,261	(Kilic, 2010)
Turquia: Ambarlı	2005	0,845	0,242	0,036**	ND	0,504	2,127	78,590	(Deniz & Kilic, 2010)
Dinamarca: Copenhagen	2003	0,743	0,162	0,017**	ND	ND	ND	ND	(Saxe & Larsen, 2004)
Turquia: Izmit	2007	1,923	1,405	0,165**	ND	ND	ND	82,753	(L, Deniz, 2013)
Turquia: Çandarlı	2007	0,631	0,574	0,057**	ND	0,032	ND	33,849	(Deniz & Kilic, 2010)
Turquia: Samsun	2015	0,728	0,574	0,064	ND	0,032	ND	ND	(Alver et al., 2018)
China: Qingdao	2014	42,900	33,200	4,540	4,180	1,850	3,660	ND	(Port et al., 2017)
China: Hong Kong	2007	8,190	17,097	1,035	ND	ND	ND	ND	(Yau et al., 2012)
		11,480	9,886	1,173	ND	521,000	1166,000	ND	(Ng et al., 2013)
China: Shenzhen	2003	6,700	1,600	0,200	0,200	0,100	0,700	ND	(Zhang et al., 2017)
China: Guangdong	2010	231,000	146,000	7,900	7,200	ND	30,000	ND	
China: Shanghai	2003	58,160	51,180	6,960*	ND	4,560	ND	3012,800	(Yang, 2007)
	2010	57,300	35,400	4,600	3.7	2,100	4,900	ND	(Zhang et al., 2017)
China: Yangshan	2009	10,800	5,600	1,100	0,900	0,500	1,100	ND	
China: Qinhuangdao	2013	86,300	64,400	6,000	5,500	2,800	6,700	ND	
China: Huanghua	2013	34,600	26,300	2,500	2,300	1,100	2,700	ND	
España: Barcelona	2009	2,508	0,219	ND	0,100	0,147	ND	331,390***	(Sanabra et al., 2014; Villalba & Demisse, 2011)
España: Algeciras	2009	3,017	0,263	ND	0,006	0,009	ND	ND	
España: Las Palmas	2009	1,501	0,131	ND	0,060	0,088	ND	ND	
España: Tenerife	2009	2,001	0,174	ND	0,081	0,120	ND	ND	
España: Valencia	2009	0,800	0,070	ND	0,046	0,072	ND	ND	
España: Málaga	2009	0,441	0,038	ND	0,018	0,027	ND	ND	
Reino Unido: Áreas pesqueras	2013	19,910	5,070	0,38**	ND	0,710	1,880	808,920	(Coello et al., 2015)
Australia: Melbourne	2011	4,375	3,940	0,478	0,440	0,099	0,277	247,618*	(Goldsworthy & Goldsworthy, 2015)
Australia: Dampier	2011	3,131	2,869	0,343	0,315	0,087	0,262	201,753*	
Australia: Brisbane	2011	3,140	3,045	0,362	0,333	0,075	0,192	197,155*	
Australia: Hay Point	2011	1,896	2,113	0,245	0,225	0,060	0,164	130,725*	
Australia: Fremantle	2011	1,597	1,798	0,204	0,187	0,046	0,127	123,79*	
Australia: Hedland	2011	1,246	1,088	0,131	0,121	0,036	0,103	78,397*	
Australia: Botany	2011	0,698	1,022	0,112	0,103	0,023	0,062	63,454*	
Australia: Gladstone	2011	0,801	0,709	0,085	0,078	0,021	0,058	49,021*	
Australia: Jackson	2011	0,585	0,403	0,047	0,044	0,013	0,050	41,465*	
Australia: Newcastle	2011	0,588	0,555	0,065	0,060	0,017	0,052	40,492*	

* CO₂ equivalente; ** Conjunto PM₁₀ y PM_{2.5}; *** CO₂ equivalente para el año 2008.

En algunos casos, se reporta la influencia de otros factores externos tales como el oleaje y el viento para disminuir la incertidumbre (Moore et al., 2018). En la mayoría de estos estudios se utilizaron factores de carga derivados de estudios anteriores, no obstante, se

tiene evidencia que algunos de estos factores están ligeramente desfasados (Yang, 2007). Es importante enfatizar que el uso de valores por defecto induce incertidumbres significativas en el cálculo de las emisiones, sin embargo, en algunos casos cuando no es posible obtener información específica sobre los factores de carga, se requieren datos de otros estudios (An et al., 2018).

La mayor parte de los estudios que calcularon las emisiones de los buques en el puerto concluyeron que la mayoría se emitió durante la etapa de “hotelling” (An et al., 2018; Maragkogianni & Papaefthimiou, 2015; Papaefthimiou et al., 2016). Las operaciones de maniobra se identifican como las menos peligrosas. Este último, debido a la corta duración de la fase de maniobra (Tovar et al., 2017).

Sin embargo, esto varía de estudio a estudio obteniéndose resultados en los que las otras etapas de operación pueden llegar a ser las más contaminantes (Chen et al., 2016; Deniz et al., 2010; L et al., 2013; Yau et al., 2012), por lo que se debe anotar que esto depende tanto tipo de embarcaciones, los tiempos y velocidades para cada fase como de las dimensiones del área de estudio.

Por ejemplo, en comparación con los buques de carga, la demanda de energía (y las emisiones) de los buques de pasajeros en el puerto es comúnmente mayor debido a un tipo diferente de patrones operativos (un continuo uso del motor auxiliar en el muelle) (Tovar et al., 2017). Pese a esto, debido a la naturaleza de la mayoría de los puertos reportados y las dimensiones de los mismo, se puede afirmar que en general las embarcaciones tipo container fueron las que generaron un mayor nivel de emisiones.

Se deben hacer mayores esfuerzos para obtener inventarios de emisiones de envío más precisos, por lo que conviene obtener datos de entrada más exactos (información técnica sobre buques, motores, factores de carga y emisión) para llegar a una metodología global y universalmente aceptada (An et al., 2018).

Con respecto a las estrategias planteadas para la disminución de las emisiones se ha planteado el uso de combustibles como el gas natural licuado llegando a reducir hasta un

100% las emisiones de SO_x y en casi un 90% los NO_x y PM (Ballini & Bozzo, 2015). Se debe agregar que esta alternativa se ve limitada por el precio del combustible, el volumen del contenedor, la capacidad de combustible del búnker del barco y la tasa del impuesto al carbono (Chengpeng et al., 2017).

Por otro lado, los Scrubbers si bien pueden llegar a reducir las emisiones de SO_x, el problema general con las emisiones de NO_x persiste. Tecnologías como “Cold-ironing” puede reducir efectivamente las emisiones peligrosas (p.ej. SO_x, NO_x, VOC, PM, CO, N₂O, CH₄) en el entorno local significativamente. No obstante, la electricidad alimentada por motores auxiliares es generalmente más barata y se debe realizar una considerable inversión de capital para estos servicios de suministro. A pesar de esto, a largo plazo si existe un beneficio económico si se tiene en cuenta las externalidades (Ballini & Bozzo, 2015; Steffens et al., 2017).

Tovar et al., 2017 desarrolló un modelo de emisiones globales en función del tráfico marítimo reportado por los sistemas de identificación automáticas (AIS) para el año 2015. Al igual que lo observado en la tabla 1, se determinó que el área de mayor emisión de contaminantes corresponde al mar chino (Figura 1: PM_{2.5}; Figura 2: SO_x).

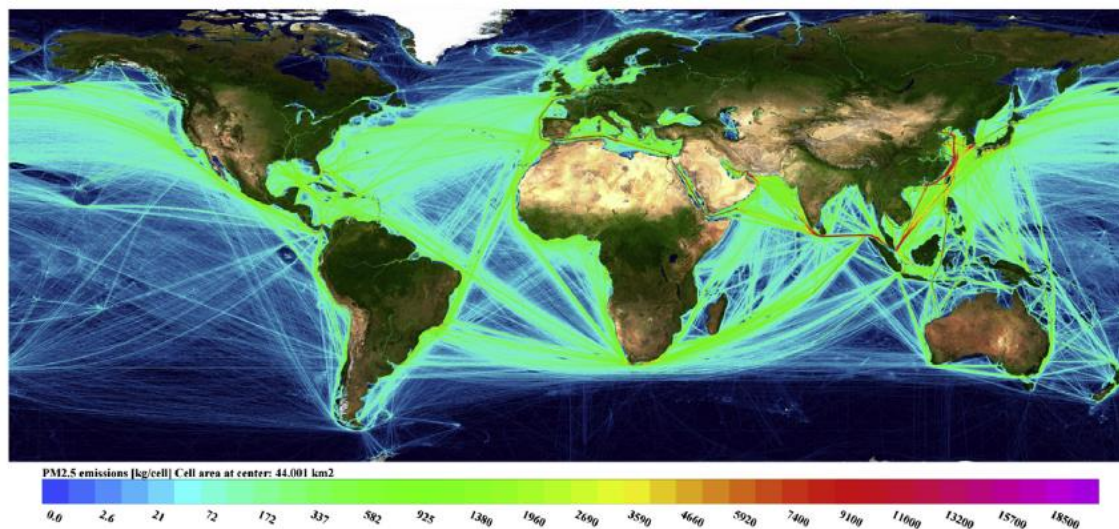


Figura 1. Emisiones globales de PM_{2.5} procedentes del tráfico marítimo (2015). Fuente: Tovar et al., 2017

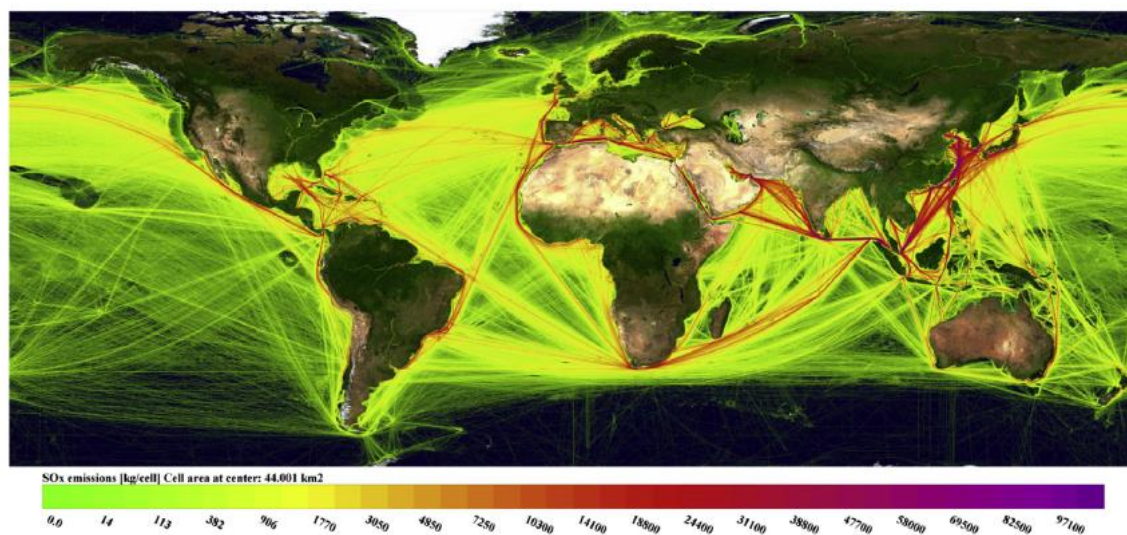


Figura 2. Emisiones globales de SO_x procedentes del tráfico marítimo (2015). Fuente: Tovar et al., 2017

Esto seguido por Asia sudoriental y meridional, en el Mar Rojo, en el Mediterráneo, en el Atlántico Norte, cerca de la costa europea, en el Golfo de México y en el Mar Caribe, y en la costa occidental de América del Norte.

8. Metodología

8.1. Área de estudio:

El Terminal Marítimo y Fluvial de Barranquilla (TMFB) (figura 3 y 4), operado por la Sociedad Portuaria Regional de Barranquilla S.A. (SPRB), se localiza 11° 58' latitud Norte y a 74° 45' longitud Oeste. Se encuentra ubicado al sur oriente de la ciudad Barranquilla, a 22 km aguas arriba de la desembocadura del Río Magdalena en el mar Caribe, y tiene acceso mediante cuatro modos de transporte: terrestre, fluvial, marítimo y aéreo («Puerto de Barranquilla», s. f.).



Figura 3. Puerto de Barranquilla. Fuente: Puerto de Barranquilla, 2018

Debido a su importancia en el sector de la economía nacional, el municipio de Barranquilla pasó a la categoría de Distrito Especial, Industrial y Portuario en 1993. Los terminales marítimos y fluviales son motores del desarrollo industrial y comercial de la Región Caribe. El puerto de Barranquilla cubre dos rutas principales, la del río Magdalena, que lo comunica con el interior del país (ventaja que no poseen los otros puertos de la Costa Caribe), y la del mar Caribe, por la que se comercian millones de toneladas con Europa y Asia (Alcaldía Distrital de Barranquilla, 2018).

El puerto de Barranquilla es la terminal más antigua del territorio, con 82 años de construcción. Es un puerto multipropósito líder del Caribe colombiano, que permite la movilización de todo tipo de carga como contenedores, gráneles sólidos y líquidos, carga general y coque. Tiene un área total de 94 hectáreas, en la cual se distribuyen: bodegas, patios de contenedores, edificios, subestaciones, basculas y 3 muelles; uno lineal de 1058 metros y 6 posiciones de atraque, otro lineal de 300 metros y 2 posiciones de atraque, y un muelle adicional de 550 metros para embarcaciones fluviales («Puerto de Barranquilla», s. f.).



Figura 4. Puerto Marítimo y fluvial de la ciudad de Barranquilla. Fuente: Google Earth.

8.2.Actividades y alcance del estudio

Las actividades y alcance del área de estudio que se contemplan en la presente investigación corresponden a:

- “**Cruising**” o navegación a toda marcha, cuya velocidad corresponde a la velocidad media obtenida de AIS. El área de estudio para el cálculo de emisiones corresponde al rango de entre 20 a 420km con respecto al TMFB (figura 5) (Fan et al., 2016; Goldsworthy & Goldsworthy, 2015; Nunes et al., 2017a). Los equipos que se contemplan para esta actividad son el motor principal (ME, por sus siglas en inglés: Main Engine) y el motor auxiliar (AE, por sus siglas en inglés: Auxiliary Engine).

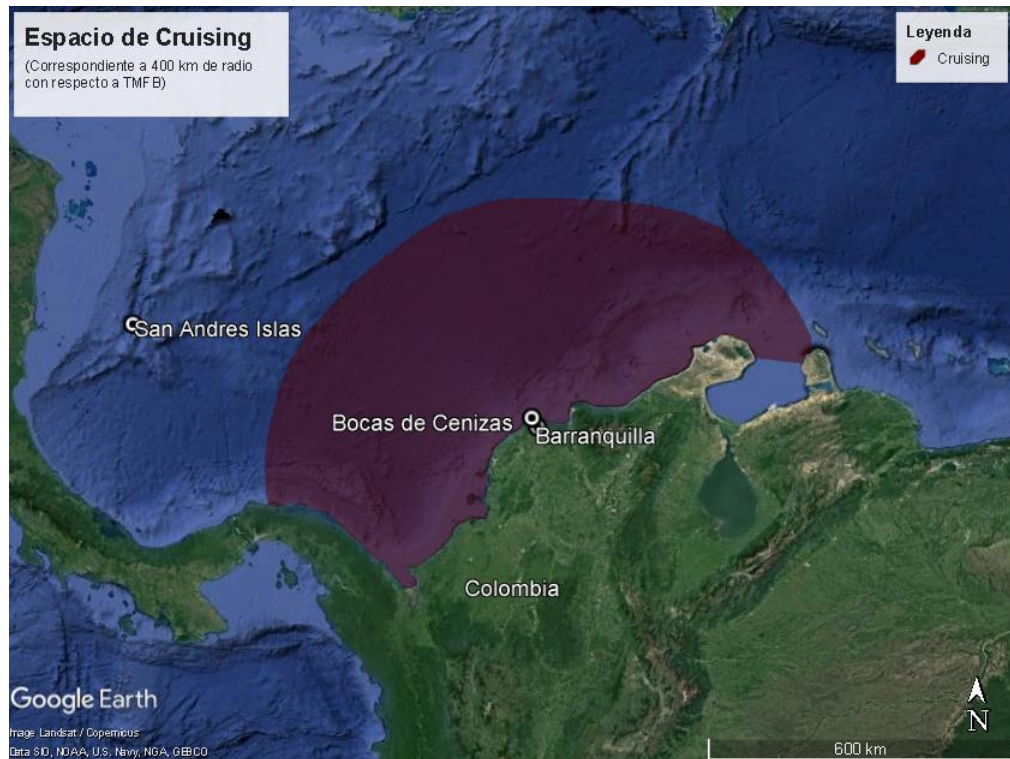


Figura 5. Espacio de Cruising considerado para la estimación. Fuente: adaptado de Google Earth

- “**Maniobra**”, Se trabajó con una velocidad media para todas las embarcaciones de 5 nudos, esto tomado en función de lo observado en AIS para el tramo del río desde el TMFB hasta la desembocadura del río Magdalena (aproximadamente 20km de longitud) (figura 6) y lo reportado por el puerto.

En este caso se asume la operación del ME, AE y el sistema de calderas auxiliares (AB).



Figura 6. Espacio de Maniobra considerado para la estimación. Fuente: adaptado de Google Earth.

- “**Hotelling**” o atraque, en donde los periodos de tiempo de esta operación fueron provistos por la sociedad portuaria. Para esta operación se asume que solo se tiene en operación AB y AE.

No se incluyeron en el modelo las posibles pequeñas embarcaciones cuyo destino fuera inferior a los 400 km. Es decir, que las emisiones para los llamados a otros puertos marítimos o fluviales pueden ser mayores. Sin embargo, debido a la naturaleza del TMFB se entiende que el número de estas embarcaciones es mínimo y casi despreciable. De igual forma, no se incluyeron factores de ajuste para factores de carga inferiores al 20% en los siguientes contaminantes: CO₂, CH₄ y N₂O, así como la generación de material particulado por la suspensión de sólidos a granel como carbón.

Por último, no se reportó información relevante de las actividades llevadas a cabo en el TMFB, como tecnologías de cargue y descargue de mercancías, gestión de operaciones, entre otros detalles. Esto con el objetivo de identificar “desperdicios de operaciones”, tal que se puedan plantear estrategias más acertadas para la disminución de los tiempos de “hotelling” y por lo tanto las emisiones totales generadas.

8.1. Método para la investigación y método de cálculo

En la figura 7, se muestra el diagrama de flujo general de la metodología ejecutada para el desarrollo del presente proyecto.

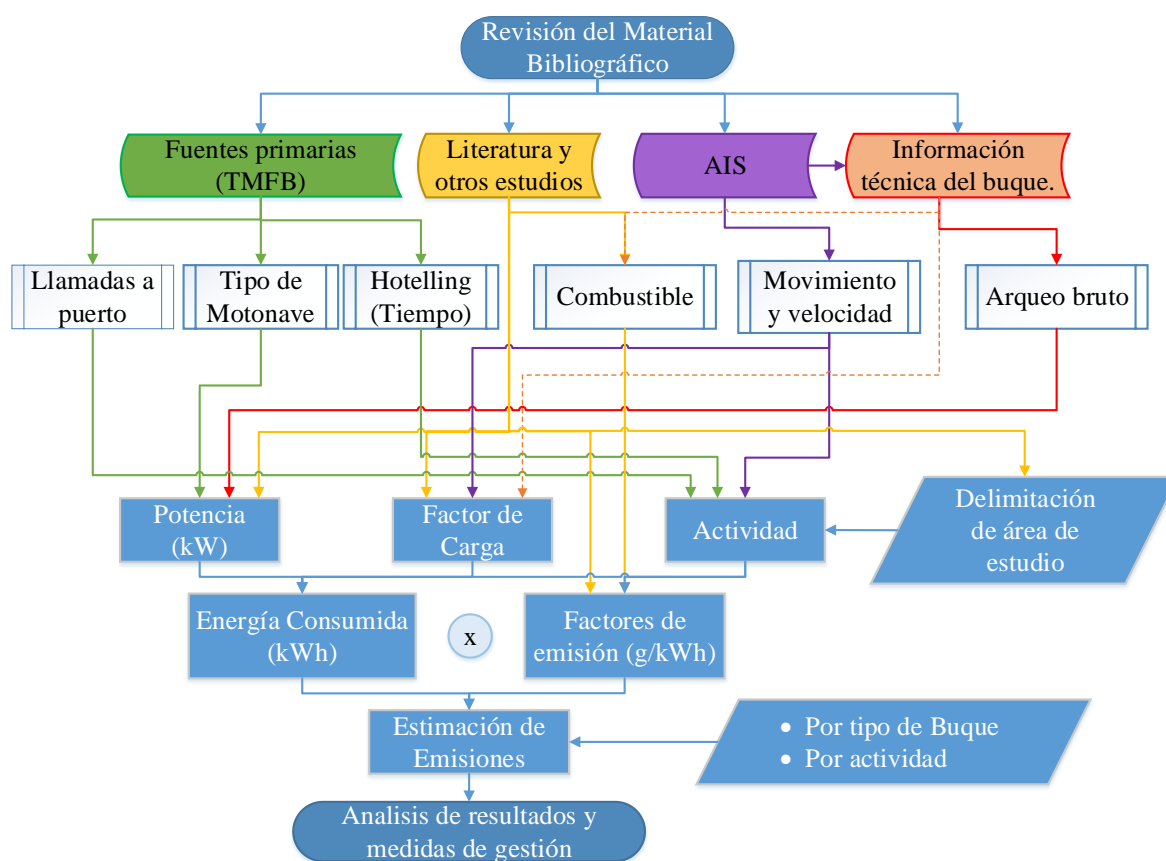


Figura 7. Metodología “bottom-up” del proyecto.

El cálculo de las emisiones de los contaminantes problema para cada embarcación se realizó en función de la actividad de las mismas (metodología “abajo hacia arriba” o “bottom-up”), es decir, que se estimó con base en las características y la actividad realizada por las motonaves. El inventario de las embarcaciones que atracaron en el TMFB para el año 2018 fue otorgado por la sociedad portuaria y la DIMAR, así como información referente al tipo (Container, General, Granelero y Granelero ‘carbón’), día y hora para su atraque y zarpe.

La información técnica referente a cada motonave fue adquirida de sistemas de identificación automática, específicamente “AIS Marine Traffic”. De la mencionada base de datos se obtuvo su año de construcción, arqueo bruto, velocidad media y máxima, y se validó la información brindada por la sociedad portuaria referente a su actividad reciente. 42 de las 651 embarcaciones estudiadas, no se encuentran reportadas en los sistemas de identificación automáticos. Para estas barcas, renombradas (Barcas i #), se asumió que se trata de embarcaciones de tamaño pequeño, cuyo año de fabricación es mayor a 20 años. Para efectos de cálculo, a estas embarcaciones se les dieron los valores de la embarcación “SMART” (Embarcación pequeña de origen colombiano). No se reportaron las actividades de otras embarcaciones de servicios en el puerto (remolcadores, barcas, lanchas, entre otros), pero se presumen insignificantes en función de sus dimensiones.

El método escogido de bottom-up fue el Tier III basado en el movimiento del barco (EEA-EMEP, 2016) donde las emisiones totales para un trayecto se pueden expresar como:

$$E_{trip} = E_{hotelling} + E_{maniobra} + E_{Cruising} \quad \text{Eq. (1)}$$

.

Para cada embarcación, la estimación de las emisiones (SO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, HC, MNVOC, CO₂, CO, CH₄ y N₂O) se realizó por medio de las siguientes ecuaciones adaptadas del estudio de la agencia ambiental europea (EEA) del 2016 (EEA-EMEP, 2016) y de diversos autores que se presentan a continuación en las ecuaciones (2), (3), (4) (Alver et al., 2018; Maragkogianni & Papaefthimiou, 2015; Nunes et al., 2017a, 2017b; Port et al., 2017).

$$E_{x,c}(ton) = \frac{D_c}{V_c} [(ME \times LF_{ME,c} \times EF_{ME,x,c} \times A \times LFA_{ME,c}) + (AE \times LF_{AE,c} \times EF_{AE,x,c} \times LFA_{AE,c})] \quad \text{Eq. (2)}$$

$$E_{x,m}(ton) = \frac{D_m}{V_m} [(ME \times LF_{ME,m} \times EF_{ME,x,m} \times A \times LFA_{ME,m}) + (AE \times LF_{AE,m} \times EF_{AE,x,m} \times LFA_{AE,m}) + (AB \times EF_{AB,x})] \quad \text{Eq. (3)}$$

$$E_{x,h}(ton) = t_h [(AE \times LF_{AE,h} \times EF_{AE,x,h} \times LFA_{AE,h}) + (AB \times EF_{AB,x})] \quad \text{Eq. (4)}$$

En donde:

- E [ton]: Emisiones del contaminante.
- D [km]: Distancia o trayectoria recorrida.
- V [km/h]: Velocidad media de la motonave.
- ME [kW]: Potencia instalada del motor principal.
- AE [kW]: Potencia instalada del motor auxiliar.
- AB [kW]: Potencia instalada de las calderas y otros equipos auxiliares.
- EF [ton/kWh]: Factor de emisión.
- A [Adimensional]: Factor tecnológico.
- LF [Adimensional]: Factor de carga.
- LFA [Adimensional]: Factor de ajuste para bajo factor de carga.
- t : Tiempo de fase u operación.

Cuyos subíndices corresponden a:

- x : Contaminante de estudio.
- c : Fase de “Cruising” o a toda marcha.
- m : Fase de maniobra.
- h : Fase de “hotelling” o atraque.
- ME : Motor principal.
- AE : Motor auxiliar.
- AB : Calderas auxiliares.

La **potencia instalada** (kW) de los motores principales se estimó en función del arqueo bruto y tipo de embarcación, a través de una regresión no lineal desarrollada por el físico italiano Trozzi, 2010. Esta corresponde a las ecuaciones (5) y (6):

$$ME = a \times GT^b \quad \text{Eq. (5)}$$

$$AE = r \times ME \quad \text{Eq. (6)}$$

En donde GT corresponde al arqueo bruto (por sus siglas en inglés: Gross tonnage); r es la relación de la potencia instalada del motor auxiliar y motor principal (AE/ME); a y b corresponden a los coeficientes de regresión. En la Tabla 4 se presentan las mencionadas variables en función del tipo de embarcación.

Tabla 4. Coeficientes de regresión lineal (r) para estimación de potencias instaladas.

Tipo	a	b	r
General	6	0,7425	0,191
Granel	35,9120	0,5276	0,222
Container	2,9165	0,8719	0,22

Fuente: Nunes et al., 2017a; Port et al., 2017; Sanabra et al., 2014; Trozzi, 2010.

No se obtuvo información referente a los sistemas de calderas de las embarcaciones que arribaron al puerto. Para el presente estudio, se asumieron dichos valores en función del tipo de embarcación con base en fuentes secundarias. En la Tabla 5 se presentan las potencias instaladas de las calderas auxiliares. Al igual que Nunes et al., 2017a, la operación de estas solo fue considerada durante las operaciones de maniobra y atraque.

Con respecto a los **factores de carga** de los motores auxiliares, al no depender directamente de la velocidad de la embarcación, estos fueron tomados de fuentes secundarias en función de la fase de operación (tabla 6).

Tabla 5. Potencia instalada de calderas auxiliares.

Tipo	Maniobra (kW)	Hotelling (kW)
Granel	132	132
Container	506	506
General	137	137

Fuente: Nunes et al., 2017a.

Tabla 6. Factores de Carga.

Fase de operación	ME LF (%)	AE LF (%)
Cruising	80	30
Maniobra	20	50
Hotelling	20	40

Fuente: Nunes et al., 2017a.

A diferencia de lo planteado en el estudio de Nunes et al., 2017a, los factores de carga trabajados para el motor principal se estimaron en función de las velocidades máximas (V_{max}) y medias (V) de cada embarcación, al igual que la metodología trabajada por Chen et al., 2016 y Styhre et al., 2017, tal como se presenta en la siguiente ecuación (7):

$$LF = \left(\frac{V}{V_{max}} \right)^3 \quad \text{Eq. (7)}$$

Para el compilado de embarcaciones del año 2018, que se estudió en la siguiente sección, se obtuvieron para los factores de carga (ME y LF) en operaciones de “Cruising” y maniobra, valores medios de 67 y 17%, respectivamente. Significativamente por debajo a los asumidos por Nunes et al., 2017a. Asimismo, al igual que Deniz et al., 2010, se asumió que ME no es operado durante la fase de “hotelling”, debido a que la función principal de este es desplazar el buque.

Al igual que con las calderas, el TMFB no reportó el **tipo de combustible** utilizado por las embarcaciones, por lo que, la estimación de emisiones se trabajó con el escenario presentado por los autores Nunes et al., 2017a, EEA-EMEP, 2016 y Entec, 2010 (Tabla 7). Esta información está respaldada por el registro de las exportaciones de combustible para buques por parte de la DIAN. De acuerdo con el decreto 2685 de 1999, artículo 110, toda embarcación con bandera extranjera, debe realizar un proceso de exportación para el abastecimiento de combustible. Consultados los expedientes para el año 2018, se observó que la totalidad de las embarcaciones que llevaron a cabo dicho procedimiento, utilizaron combustible perteneciente a la categoría BFO (por sus siglas en inglés: Bunker Fuel Oil) para el motor principal y poco más de la mitad en el motor auxiliar (mismo escenario presentado por los mencionados autores) (Quality Bunkers Supply, 2018).

Debido a la naturaleza del TMFB, las embarcaciones de pasajeros no son tenidas en consideración. El hecho que el BFO tenga el menor costo y que no exista una legislación fuerte con respecto a la calidad de estos en Colombia respalda la sospecha fundada que sea este el combustible de mayor uso.

Para los factores de carga, además del tipo de combustible utilizado, se tuvo en cuenta el tipo de motor utilizado en la embarcación. El perfil de los motores en función del arqueo bruto de los mismo fue tomado del inventario de emisiones por embarcaciones del Reino Unido del año 2007 (Entec, 2010) (Tabla 8), el cual contempla más de 14 mil motonaves.

Tabla 7. Tipo de Combustible por tipo de motonave.

Tipo	ME	AE	AB
Grael	BFO	MGO	BFO
Container	BFO	BFO	BFO
General	BFO	MGO	BFO
Pasajero	MDO	MDO	BFO

Fuente: Nunes et al., 2017a; Entec, 2010.

En donde MDO es combustible diésel para uso marítimo y MGO gasóleo marino.

Tabla 8. Tipo de motor en función de tipo de embarcación y arqueo bruto.

Tipo	$\leq 5\ 000$ GT	5 000 – 25 000 GT	$> 25\ 000$ GT
Grael	MSD	SSD	SSD
Container	MSD	MSD	SSD
General	MSD	SSD	SSD
Pasajero	HSD	MSD	MSD

Fuente: Nunes et al., 2017a; Entec, 2010.

En donde:

HSD es diésel de velocidad alta ($\text{RPM} > 1\ 000$; High speed diesel),

MSD diésel de velocidad media ($300 < \text{RPM} \leq 1\ 000$; Medium speed diesel)

SSD diésel de velocidad baja ($\text{RPM} \leq 300$; Slow speed diesel).

En la tabla 9 se presentan los **factores de emisión** trabajados (SO_2 , NO_x , NMVOC, HC, CO_2 , CO, $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , CH_4 Y N_2O), ésta en función del tipo de combustible y motor, así como de la actividad de la embarcación para ME, AE y AB. Además, los factores de corrección para factores de carga inferiores al 20% se presentan en la tabla 10 (Nunes et al., 2017^a).

Tabla 9. Factores de emisión (g/kWh).

Motor	Actividad	Tipo motor	Combustible	SO ₂	NO _x - 2000	NO _x - 2005	NO _x - 2010	NM VOC	HC	CO ₂	CO	PM _{2,5}	PM ₁₀	CH ₄	N ₂ O
ME	Cruising	SSD	BFO	10,5	18,1	17,5	16,9	0,6	0,6	620	0,5	1,31	1,42	0,006	0,031
		SSD	MDO	3,7	17	16,4	15,8	0,6	0,6	588	0,5	0,45	0,42	0,006	0,031
		SSD	MGO	0,9	17	16,4	15,8	0,6	0,6	588	0,5	0,31	0,28	0,006	0,031
		MSD	BFO	11,5	14	13,5	13	0,5	0,5	677	1,1	1,43	1,32	0,004	0,031
		MSD	MDO	4,1	13,2	12,8	12,3	0,5	0,5	645	1,1	0,47	0,43	0,004	0,031
		MSD	MGO	1	13,2	12,8	12,3	0,5	0,5	645	1,1	0,31	0,29	0,004	0,031
		HSD	BFO	11,5	12,7	12,3	11,8	0,2	0,2	677	1,1	1,47	1,35	0,004	0,031
		HSD	MDO	4,1	12	11,6	11,2	0,2	0,2	645	1,1	0,58	0,53	0,004	0,031
		HSD	MGO	1	12	11,6	11,2	0,2	0,2	645	1,1	0,35	0,32	0,004	0,031
	Maniobra Hotelling	SSD	BFO	11,6	5,1	4,8	4,7	2,5	1,8	682	1	1,32	1,43	0,012	0,031
		SSD	MDO	4,1	5	5	4,7	2,6	1,8	647	1	0,44	0,47	0,012	0,031
		SSD	MGO	1	5	5	4,7	2,6	1,8	647	1	0,29	0,31	0,012	0,031
		MSD	BFO	12,7	47,9	46,2	44,6	6,3	1,5	745	2,2	1,32	1,44	0,008	0,031
		MSD	MDO	4,5	47,5	45,7	44,3	6,6	1,5	710	2,2	0,46	0,5	0,008	0,031
		MSD	MGO	1,1	47,5	45,7	44,3	6,6	1,5	710	2,2	0,3	0,32	0,008	0,031
		HSD	BFO	12,7	43,6	42,3	40,6	8,2	0,6	745	2,2	1,32	1,44	0,008	0,031
		HSD	MDO	4,5	43	41,7	40,1	8,6	0,6	710	2,2	0,46	0,5	0,008	0,031
		HSD	MGO	1,1	43	41,7	40,1	8,6	0,6	710	2,2	0,3	0,32	0,008	0,031
	Cruising	MSD	BFO	12,3	64,8	62,5	60,4	1,7	0,4	722	0,9	1,32	1,44	0,004	0,031
		MSD	MDO	4,3	64,1	62	59,7	1,8	0,4	690	0,9	0,45	0,49	0,004	0,031
		MSD	MGO	1,1	64,1	62	59,7	1,8	0,4	690	0,9	0,29	0,32	0,004	0,031
		HSD	BFO	12,3	51,1	49,4	47,6	1,7	0,4	722	1,3	1,32	1,44	0,01	0,031
		HSD	MDO	4,3	50,2	48,6	46,8	1,8	0,4	690	0,8	0,45	0,49	0,01	0,031
		HSD	MGO	1,1	50,2	48,6	46,8	1,8	0,4	690	0,8	0,29	0,32	0,01	0,031
AB	Maniobra Hotelling	-	BFO	18,1	1,7	1,6	1,6	0,3	0,3	1067	0,4	1,35	1,47	0,02	0,08

Fuente: Nunes et al., 2017a

Tabla 10. Factores de ajustes para LF < 20% (adimensional).

LF	SO ₂	NO _x	PM	HC	CO	LF	SO ₂	NO _x	PM	HC	CO
0.01	1	11.47	19.17	59.28	19.32	0.11	1	1.17	1.3	1.96	1.79
0.02	1	4.63	7.29	21.18	9.68	0.12	1	1.14	1.24	1.76	1.64
0.03	1	2.92	4.33	11.68	6.46	0.13	1	1.11	1.19	1.6	1.52
0.04	1	2.21	3.09	7.71	4.86	0.14	1	1.08	1.15	1.47	1.41
0.05	1	1.83	2.44	5.61	3.89	0.15	1	1.06	1.11	1.36	1.32
0.06	1	1.6	2.04	4.35	3.25	0.16	1	1.05	1.08	1.26	1.24
0.07	1	1.45	1.79	3.52	2.79	0.17	1	1.03	1.06	1.18	1.17
0.08	1	1.35	1.61	2.95	2.45	0.18	1	1.02	1.04	1.11	1.11
0.09	1	1.27	1.48	2.52	2.18	0.19	1	1.01	1.02	1.05	1.05
0.1	1	1.22	1.38	2.18	1.96	0.20	1	1	1	1	1

Fuente: Port et al., 2017.

Con respecto a lo factores tecnológicos, el cual implica el uso de tecnologías para la reducción de emisiones (filtros, scrubbers, etc.), tanto TMFB como la base de datos AIS no reportó dicha información. Sin embargo, debido a la nula legislación referente a

emisiones atmosféricas por parte de estas fuentes en la región, se asumió el mencionado factor en 1 (Sin tecnologías de reducción o mitigación).

Para la estimación del CO₂ equivalente en función del Óxido Nitroso y Metano, se hizo uso de las equivalencias de la tabla 11.

Tabla 11. Equivalencia de contaminantes secundarios (adimensional).

Gas de efecto invernadero	Equivalencia a CO ₂
CO₂	1,00
CH₄	25,0
N₂O	298

Fuente: (European platform on life cycle assessment [EPLCA], 2009; IPCC, 2007)

8.2. Procedimiento de cálculo

La metodología de cálculo se explicará usando como ejemplo la motonave “X-PRESS TAJUMULCO” (figura 8). Esta embarcación tipo Container, arribó al puerto el 11/01/2018 y partió el 12/01/2018, estando en el puerto por 11 horas y 30 minutos (El presente ejemplo sólo considera el mencionado llamado a puerto, sin embargo, esta arribó 15 veces durante el 2018). De la base de datos AIS se reporta:

- IMO: 9412476
- Año de construcción: 2010
- Velocidad Máxima: 11.2 Nudos.
- Velocidad Media: 8.7 Nudos
- Arqueo Bruto: 9994



Figura 5. Motonave: X-PRESS TAJUMULCO. Fuente: MarineTraffic.

De las Ecuaciones (5), (6) y la tabla 4 se calcularon las potencias de ME y AE de X-PRESS TAJUMULCO:

$$ME = a \times GT^b$$

$$ME = 2,9165 \times 9994^{0.8719} \approx 8958,49 \text{ kW}$$

$$AE = r \times ME$$

$$AE = 0.22 \times 8958,49 \text{ kW} \approx 1970,87 \text{ kW}$$

Con respecto la potencia instalada para la caldera se trabajó con lo presentado en la tabla 5 (506 kW).

Para los factores de carga se usa la Ecuación (7):

$$LF = \left(\frac{V}{V_{max}} \right)^3$$

$$LF_{ME,c} = \left(\frac{8.7 \text{ nudos}}{11.2 \text{ nudos}} \right)^3 \cong 0,47$$

$$LF_{ME,m} = \left(\frac{5 \text{ nudos}}{11.2 \text{ nudos}} \right)^3 \cong 0.19$$

Como ya se mencionó, se asume que ME no opera durante la fase de atraque o “hotelling”.

Con respecto a AE, se trabajó con los valores de la tabla 6.

$$LF_{AE,c} = 0.3$$

$$LF_{AE,m} = 0.5$$

$$LF_{AE,h} = 0.4$$

Los requerimientos de energía (energía consumida; figura 7), se pueden calcular mediante las ecuaciones (2), (3) y (4). Esto sin considerar las diferentes variables para la estimación de emisiones (factores de emisión, ajuste y tecnología). Es decir, que corresponde a al producto de la potencia instalada, factor de carga y tiempo de ejecución de la actividad. Se tiene entonces:

$$Energía_c = \frac{D_c}{V_c} (ME \times LF_{ME,c} + AE \times LF_{AE,c})$$

$$Energía_c = \frac{400 \text{ km}}{11.2 \text{ nudos} \times 1.852 \left(\frac{\text{km}}{\text{h} \cdot \text{nudos}} \right)} (8958,49 \text{ kW} \times 0,47 + 1970,87 \text{ kW} \times 0.3)$$

$$Energía_c = 118919,29 \text{ kWh}$$

El procedimiento para el cálculo del requerimiento de energía en fases de maniobra y “hotelling” siguen el mismo procedimiento, pero para “hotelling” no se considera la operación de ME y para ambas actividades (maniobra y “hotelling”) se agrega la potencia instalada de las calderas. Tal que se tiene:

$$Energía_m = 5524,16 \text{ kWh}$$

$$Energía_h = 14884,99 \text{ kWh}$$

En “Hotelling” no se consideran consumos procedentes de las operaciones directamente realizadas desde el puerto para acciones de desembarque y/o embarque.

Para el cálculo de las estimaciones se asume que el factor de tecnología (A) es igual a uno, es decir, se entiende que la motonave no cuenta con tecnologías de limpieza o reducción. El tipo de combustible fue BFO (combustible relativamente pesado para uso marítimo) para el motor principal (ME), auxiliar (AE) y las calderas (AB) (tabla 7). En función del arqueado bruto (9994) de la embarcación, se determinó el tipo de motor instalado (SSD: Diésel de velocidad baja) (tabla 8). A continuación, se presenta el cálculo de las emisiones para los NOx, el cual corresponde al producto de los factores de emisión (tabla 9), el factor tecnológico y el consumo de energía en cada fase de operación (lo que correspondería a las ecuaciones (2), (3) y (4)).

$$E_{NOx,c}(ton) = \left[\left(81195,82 \text{ kWh} \times 16,9 \frac{g \text{ NOx}}{kWh} \right) + \left(11401,98 \text{ kWh} \times 60,4 \frac{g \text{ NOx}}{kWh} \right) \right] \\ \times \frac{1 \text{ ton NOx}}{10^6 g \text{ NOx}} \cong 2,06 \text{ ton NOx}$$

Se sigue el mismo procedimiento para las emisiones durante las fases de “Hotelling” y maniobra, siendo que en esta última se agrega un factor de ajuste por un factor de carga inferior al 20% ($LFA_{NOx,19\%} = 0.01$; tabla 10).

$$E_{NOx,m}(ton) \cong 0,076 \text{ ton NOx}$$

$$E_{NOx,h}(ton) \cong 0,55 \text{ ton } NOx$$

$$E_{NOx,totales}(ton) \cong 2,69 \text{ ton } NOx$$

Por motivos de practicidad en el presente documento no se presenta el procedimiento para los demás contaminantes estudiados.

9. Resultados

9.1. Emisiones.

Como ya se mencionó, al TMFB arribaron durante el año 2018 un total de 651 motonaves, de las cuales 399 corresponden a tipo container, 140 tipo granel (incluyendo las que transportaban carbón) y 112 de tipo general (figura 9).

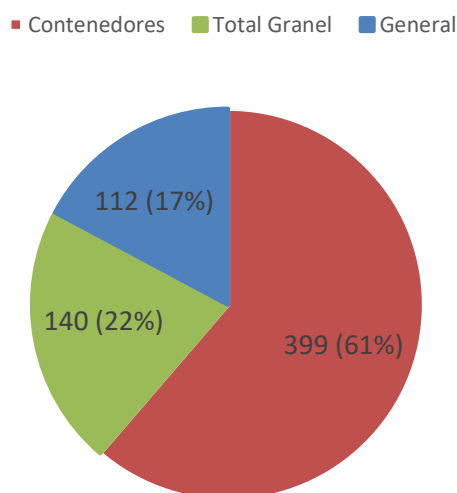


Figura 6. Número y tipo de motonaves que arribaron al TMFB (2018).

Este comportamiento, en el que la mayoría de embarcaciones que llegaron al puerto fueron tipo container, se mantuvo constante a lo largo de todo el año 2018 (Figura 10), habiendo cambios poco significativos con respecto a los porcentajes de cada tipo.

Del total de embarcaciones, el 6% de las motonaves no están identificadas en AIS Marine Traffic. Estas fueron agregadas en el conjunto de embarcaciones tipo container en función de lo reportado por el TMFB.

El análisis de los movimientos en el puerto tiene implicaciones socio-económicas regionales y nacionales, por lo que el estudio de la variación en el número de motonaves arribadas a lo largo del año no es competencia del presente proyecto. No obstante, el tener presente estos cambios es de vital importancia a la hora de analizar el cambio en las

emisiones, ya sea con respecto a los meses estudiados, así como con otros contaminantes estudiados.

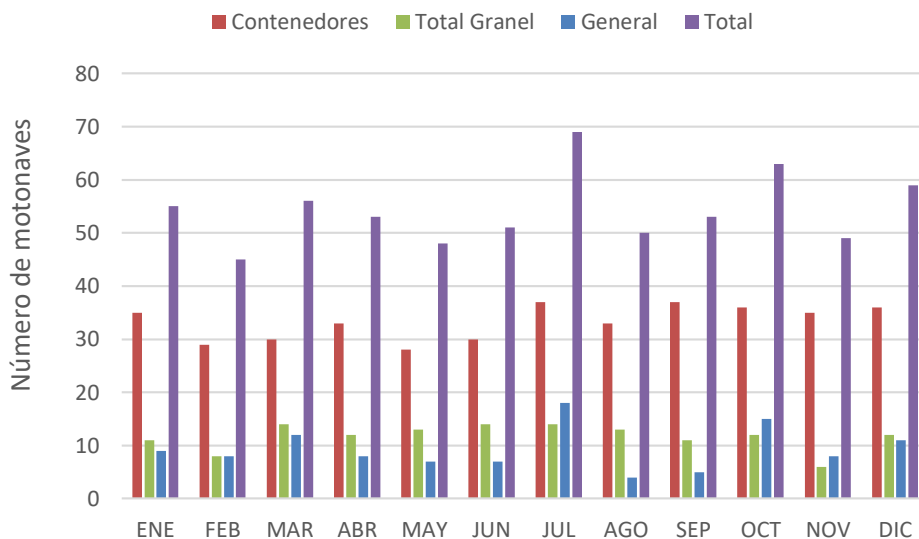
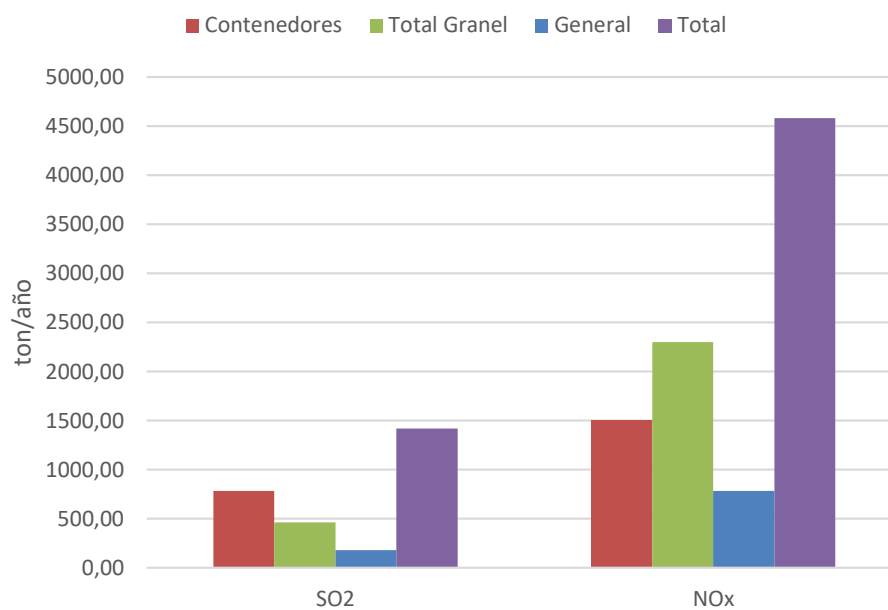


Figura 7. Número de motonaves -2018

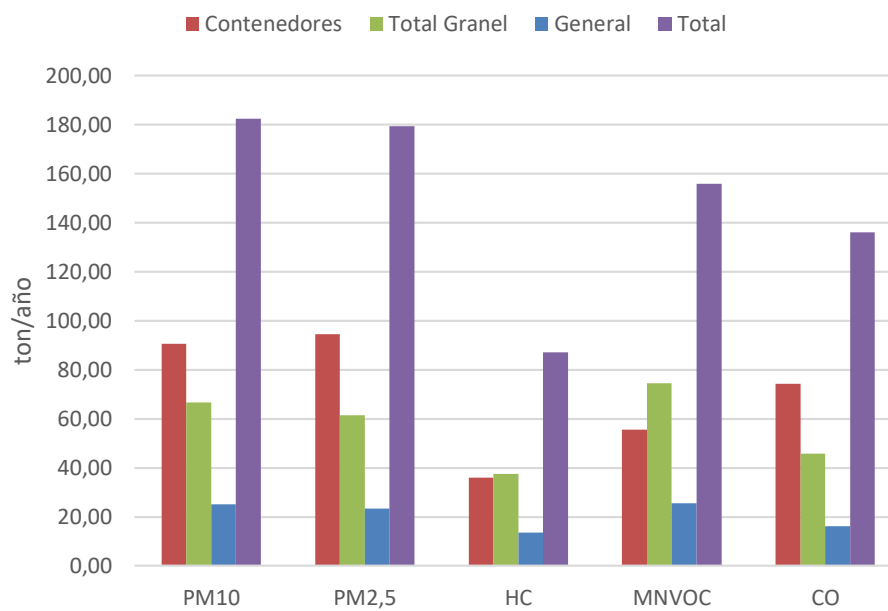
Con respecto al tipo de combustible, se consideró que todas las embarcaciones (100%) utilizaron combustible relativamente pesado (BFO) en el motor principal y las calderas. Para el motor auxiliar, aproximadamente el 61% de las embarcaciones utilizaron combustible relativamente pesado, mientras que el 39% restante utilizó gasóleo. Esto en función del tipo de motonave y lo ya presentado en la sección anterior del presente proyecto (tabla 7). De acuerdo al tipo de motor instalado (velocidad), la mayoría de estos fueron MSD (Diésel Velocidad Media: 411), seguidos por SSD (Diésel Velocidad baja: 222) y HSD (Diésel Velocidad alta: 18).

En la figura 11 se presentan emisiones totales generadas de contaminantes primarios y gases de efecto invernadero derivados del TMFB para el año 2018. El mayor contaminante primario emitido de esta categoría corresponde a los NO_x , con un total de 4583,18 ton/año, seguido por SO_2 (1417,34 ton/año), PM_{10} (182,52 ton/año), $\text{PM}_{2.5}$ (179,42 ton/año), MNVOC (155,84 ton/año), CO (136,19 ton/año) y HC (87,10 ton/año).

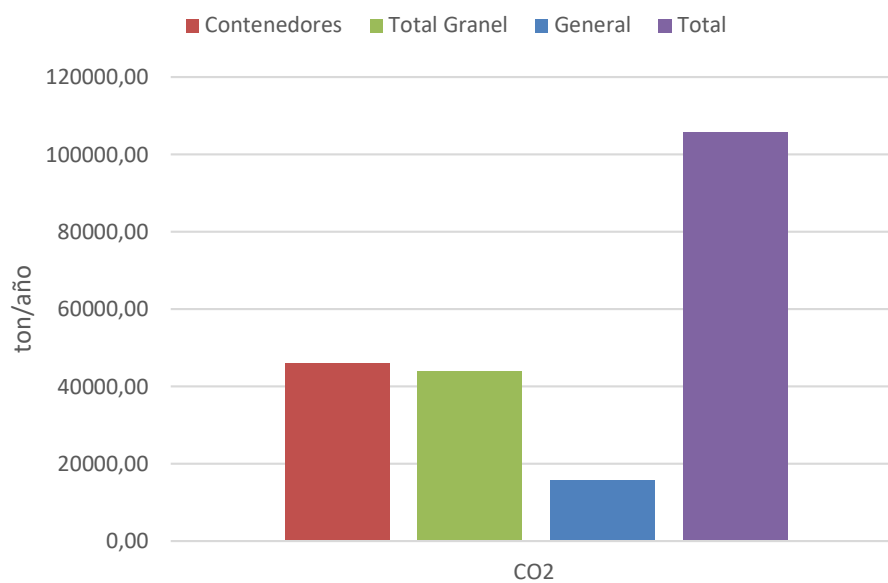
a)



b)



c)



d)

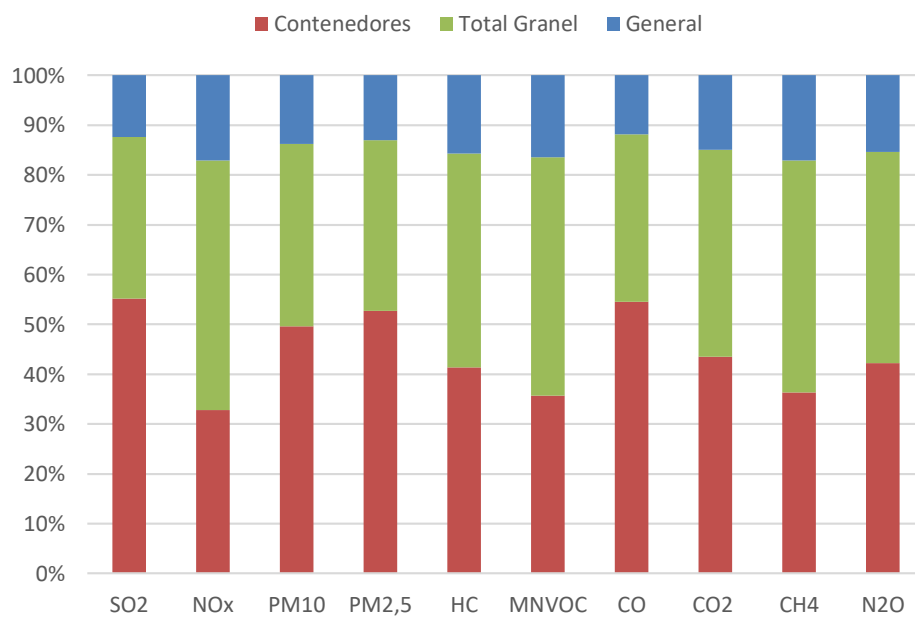


Figura 8 a,b,c y d. Emisiones totales de contaminantes primarios y gases de tipo invernadero por tipo de motonave estimadas para 2018 en TMFB.

De acuerdo al tipo de embarcación, las mayores emisiones totales fueron generadas por el tipo container, exceptuando las emisiones de NO_x , HC, MNVOC, CH_4 y N_2O , que fueron mayores para el tipo granel, con diferencias de 792,24 ton, 1,42 ton y 1,82 ton, 0,08 ton y 0,01 ton, respectivamente. Lo anterior llama la atención, por el hecho de representar solo el 22% de las embarcaciones estudiadas frente al 61% que corresponden a tipo container.

La generación de NO_x mayor por parte de las motonaves tipo granel puede radicar en los tiempos de “hotelling”. Por un lado, las motonaves tipo container, tienen una media de permanencia en puerto de 14 horas (0.6 días), las de tipo granel una media de 95 horas (4 días), y las de carga general 72 horas (3 días). La duración de las embarcaciones en puerto depende de varios factores, como la facilidad del cargue y descargue de mercancías, la gestión del TMFB, la tecnología usada en puerto (grúas, tornillos sin fin, elevador de canjilones, etc), entre otros. Probablemente, estos tiempos mayores de permanencia pueden ocasionar las mayores emisiones de NO_x , a pesar de representar solamente 1/3 del número total del tipo container. Adicionalmente, el arqueo bruto (GT), puede ser otra de las razones de un mayor número de emisiones, pues las motonaves tipo granel en este estudio, presentaron una media de 24049, frente a los 13178 y 11217 del tipo container y general. En función de la metodología aplicada, un mayor GT implica una mayor potencia instalada, lo cual resulta lógico teniendo en cuenta que se debe transportar un mayor volumen de mercancías, y la potencia instalada a su vez se traduce en mayores emisiones atmosféricas. Esto se corrobora en la figura 11d, en donde se aprecian los porcentajes de los contaminantes antes mencionados.

Como era de esperarse el CO_2 corresponde al mayor contaminante emitido (considerando tanto contaminantes primarios como gases de efecto invernadero), con un total de 105677 ton/año. Para el resto de gases de efecto invernadero se obtuvieron cantidades muy bajas con respecto al CO_2 (N_2O con 4,95 ton/año y CH_4 con 0,77 ton/año), por lo que las cantidades de CO_2 equivalente (107171 ton/año) no cambian significativamente con la antes mencionada.

En las figuras 12, 13 y 14, se presentan las emisiones de los contaminantes primarios en función de los meses del año 2018. Se observa que la cantidad de emisiones no depende únicamente de la cantidad de embarcaciones arribadas al puerto, sino que influyen otros parámetros. Meses como abril y mayo no siguen la misma tendencia en la que hay una disminución de llamadas a puerto, pero con aumento de emisiones con respecto a otros meses. Por un lado, los porcentajes de emisiones entre cada contaminante mes a mes, así como las emisiones totales puede variar en función de los porcentajes de cada tipo de embarcación arribadas al puerto. Asimismo, también se deben considerar los tiempos medios de permanencia durante las operaciones de “Hotelling”.

Tal es el caso del mes de mayo, el cual registra el mayor tiempo medio de “Hotelling” para todas las embarcaciones arribadas (≈ 59 horas), o el mes de Julio que, a pesar de tener el mayor número de llamados a puerto, no implicó ser el de mayores contribuciones para algunos contaminantes debido a que los tiempos de “Hotelling” fueron relativamente bajos (≈ 41 horas).

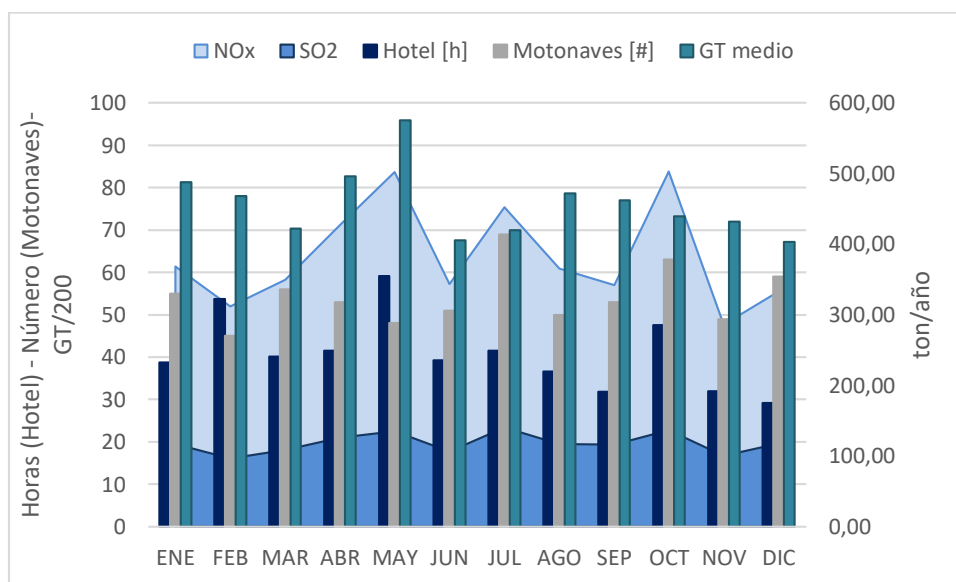


Figura 92. Emisiones mensuales de SO_2 y NO_x en función del número de embarcaciones arribadas.

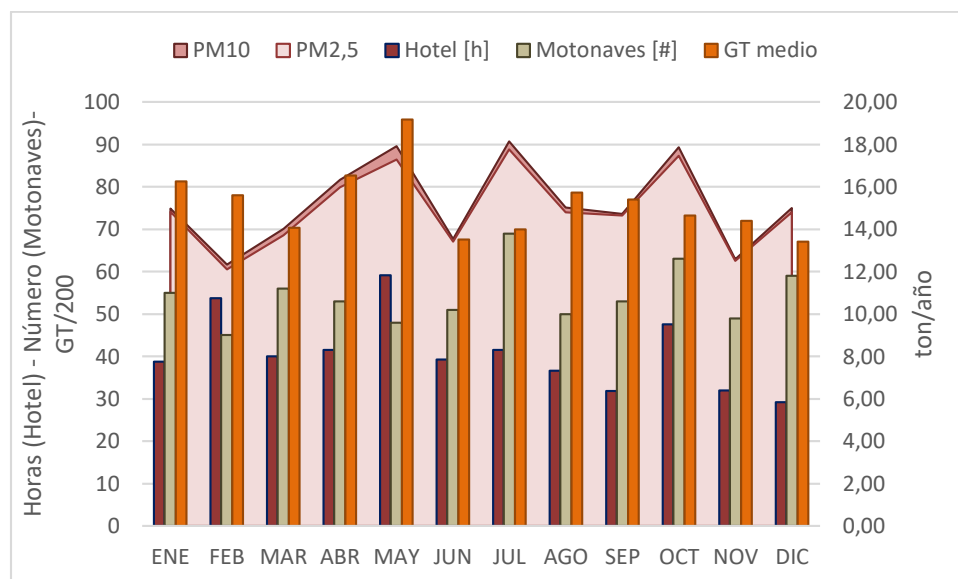


Figura 103. Emisiones mensuales de PM_{10} , $PM_{2,5}$ en función del número de embarcaciones arribadas.

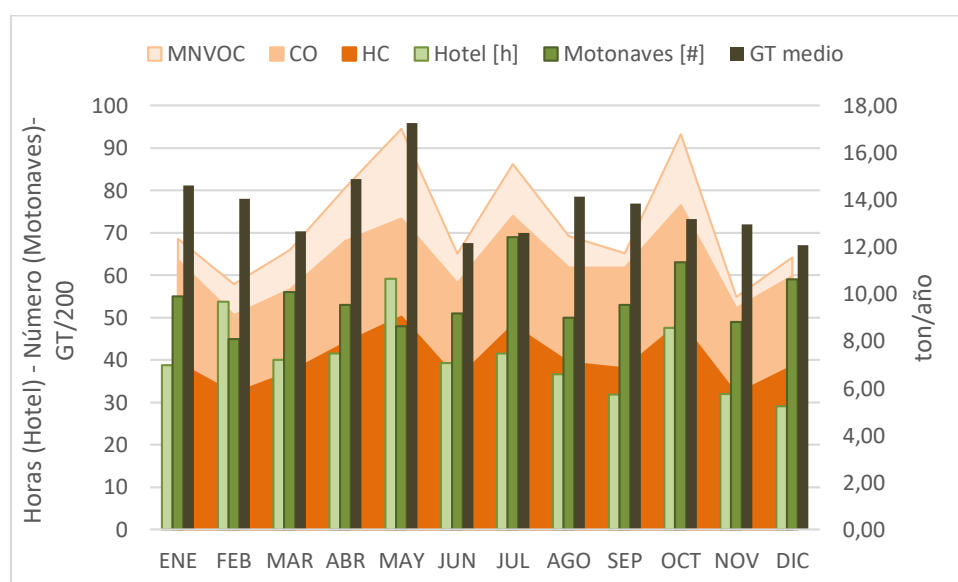


Figura 114. Emisiones mensuales de HC, MNVOC y CO en función del número de embarcaciones.

Para el mes de febrero, en donde no es tan significativa la diferencia en llamadas a puerto y tiempos de “Hotelling” con respecto a mayo, se puede explicar la diferencia en la cantidad de emisiones (en donde mayo es significativamente mayor) debido a que el arqueo bruto medio de las motonaves fue mucho mayor que el de febrero.

En la figura 15 se analizan las emisiones de los contaminantes estudiados en función de los motores y las calderas. Esta corresponde a los datos del compilado de embarcaciones. Para cada tipo o categoría de embarcación estudiada se obtuvieron resultados similares con respecto a los porcentajes de participación de los contaminantes. Estos últimos se presentan en el documento Anexo 1 (Hoja: “Datos Agrupados 2”).

En general, el motor principal es el mayor foco de emisión de contaminantes, debido a la capacidad (potencia instalada) y naturaleza del mismo, con respecto a los motores secundarios y las calderas. Además, la calidad del combustible utilizado es mala con respecto al motor auxiliar, donde se asumió que el 39% de los barcos usaban gasóleo marino; mientras que, para las calderas y los motores principales, se asumió el uso de combustible pesado.

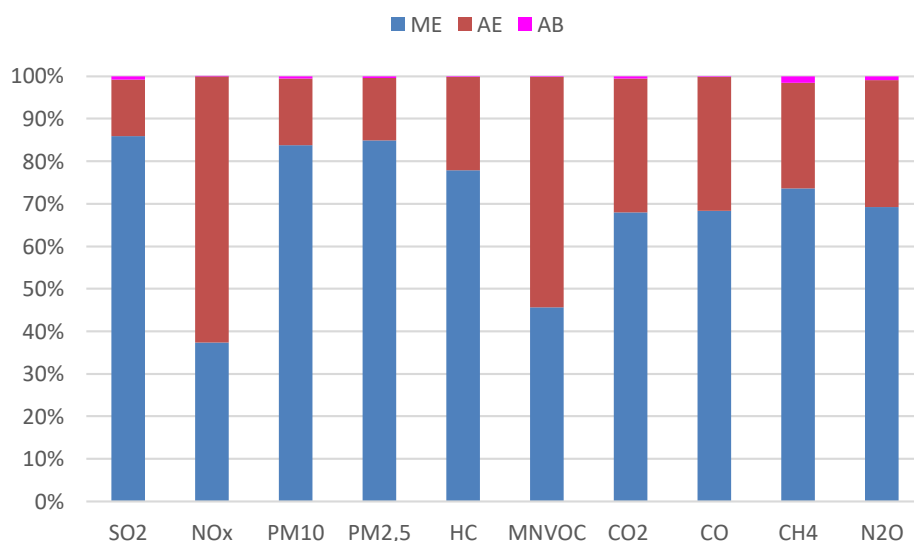


Figura 125. Porcentaje de las emisiones por generador de energía (Compilado). ME: Motor principal, AE: Motor auxiliar y AB: Calderas

Analizando la tabla 9 (los factores de emisión para AE con respecto a otros equipos) y la Figura 15, se puede afirmar que los motores auxiliares contribuyeron más en las emisiones de la mayoría de los contaminantes estudiados. Posiblemente porque para tiempos prolongados de “Hotelling” (donde se asume que no opera el motor principal), es muy

posible que el motor auxiliar sea la principal fuente de emisión de contaminantes. Tal fue el caso de NO_x y MNVOC.

Esto último se puede confirmar con la figura 16, la cual ilustra las emisiones generadas para cada una de las fases u operaciones llevadas a cabo por las embarcaciones. En esta se observa que los contaminantes NO_x y MNVOC son mayormente generados durante la fase de “Hotelling”. Exceptuando los dos contaminantes mencionados, la fase en la que se genera una mayor cantidad de contaminantes correspondió a “Cruising”, al igual que lo reportado en gran parte de los estudios revisados en el Estado del Arte del presente proyecto. Sin embargo, se debe recordar al lector que algunos estudios no llegan a esta misma conclusión debido a que no consideran la etapa de “Cruising” o limitan la distancia destinada para esta operación muy por debajo a la trabajada.

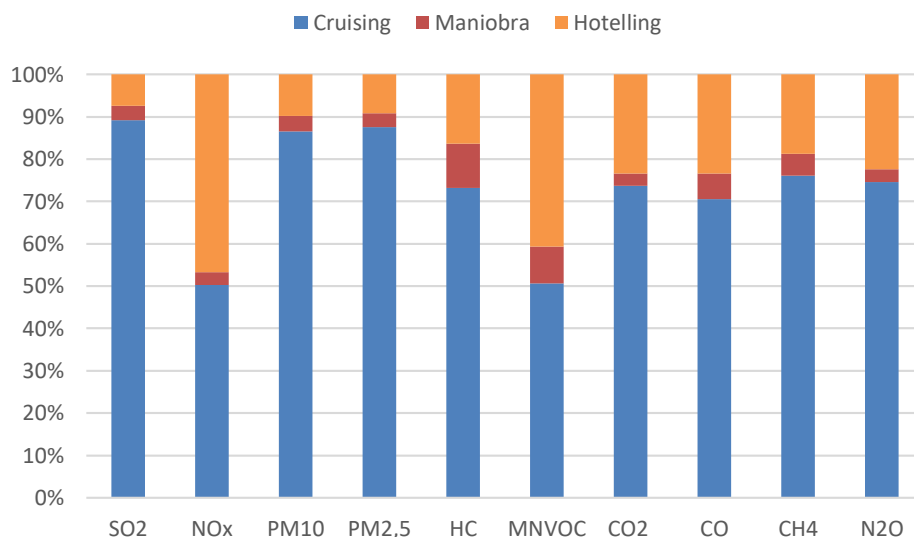


Figura 136. Porcentaje de emisiones en función de la Actividad de las embarcaciones.

Para mayor detalle de las emisiones en función del tipo de embarcación, fase o actividad, equipo (ME, AE, AB), periodo del año (mese, trimestres, etc) e incluso las estimaciones de cada embarcación por llamada (sea por equipo o actividad), y demás información relevante para la estimación, consulte el documento Anexo 1 (Hojas: “Motonaves 2018”, “Datos Agrupados 1” y “Datos Agrupados 2”).

9.2. Comparación con otros puertos

Para comparar los resultados obtenidos, con algunos estudios realizados en otros puertos, se deben mencionar ciertos factores que limitan de manera significativa dicha comparación.

Si bien, todos los estudios mencionados durante el desarrollo del estado del arte del presente proyecto fueron ejecutados haciendo uso de la metodología “Bottom-up”, cada uno presenta sus propias particularidades, de acuerdo a diferentes consideraciones hechas por los autores, así como de las condiciones geográficas y finalidad del estudio en cuestión. Por ejemplo, de las 24 estimaciones reportadas (tabla 1), 8 no consideraron la fase de “Cruising” en sus cálculos. Asimismo, 16 estudios si consideraron la mencionada fase, de los cuales 3 no reportaron la distancia utilizada y 11 trabajaron con distancias muy cortas en función de la ubicación geográfica de los mismos o la jurisdicción de las ciudades en la que se encuentran los puertos. Sólo 3 estudios reportaron 400 km a partir de la costa como área para estudio (incluyendo estudio sobre el mar chino: Fan et al., 2016). Para mayor información de las distancias de “Cruising” y otros comentarios para los estudios citados, véase el documento Anexo 2 (hoja: “Estudios”).

Entre otras consideraciones que pueden involucrar un aumento o disminución significativa de los errores, está el hecho de considerar el funcionamiento de ME durante la fase de “Hotelling”, el uso de diversas fuentes de información (desfases de la realidad), estimación y/o asunción de parámetros técnicos de las embarcaciones, entre otros. Moreno-gutiérrez et al., (2019) determinó que estas variaciones están entre un rango del 9 al 10% para las variaciones metodológicas de “bottom-up” analizadas y que los errores más significativos derivaban de información obtenida de las bases de datos AIS.

Por otro lado, la naturaleza de los barcos que arriban a los puertos puede ser muy diferente una de otra con respecto a la actividad que se presente en estos. Por ejemplo, puertos dedicados a actividades pesqueras, de transporte de pasajeros, petroleros, solo container o granel, etc. Esto puede traer implicaciones significativas con respecto a las emisiones en

función de las llamadas a puerto. De la misma forma, pueden contar con tecnologías para el cargue y descargue de mercancías (Grúas tecnificadas, elevadores de canjilones, bandas transportadoras, entre otros), las cuales pueden disminuir los tiempos de “Hotelling” de manera significativa, y a su vez generar menores emisiones. Además, que en función de la localización de los mismos se puede tener o no una legislación más fuerte, así como medidas de gestión para la reducción de emisiones.

Por último, las fechas de la toma de datos de muchos de los estudios son distintas o antiguas, por lo que no muestra la realidad actual de los mencionados puertos (tabla 1)

Teniendo en cuenta estas limitaciones, se compararon los resultados del presente estudio del puerto de Barranquilla con los resultados obtenidos en los puertos estudiados por Nunes et al., (2017) (Portugal) y Goldsworthy & Goldsworthy, (2015) (Australia). En las figuras 17 a 20 se presentan las emisiones de NO_x y SO_2 , PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$, HC y CO, y CO_2 de los puertos estudiados, respectivamente. Se observa que el orden en las cantidades de emisiones para todos los contaminantes tiene muy pocos cambios entre los puertos, es decir, que independiente del contaminante que se esté analizando se mantienen casi una misma proporción con respecto a otros puertos. Teniéndose contadas excepciones como las emisiones de NO_x en el puerto de Setábul (el mayor emisor de esta especie entre los puertos comparados), pero que para los contaminantes restantes el mayor puerto emisor corresponde a Sines.

De las mencionadas figuras se puede apreciar que no existe una relación directa entre las llamadas a puerto con la cantidad de emisiones en general. Como ya se mencionó, existen una gran variedad de factores que influyen de manera significativa en la cantidad de emisiones. Por ejemplo, regulaciones en el uso de combustibles para la disminución de emisiones de SO_2 , los tiempos de “hotelling”, los tipos y porcentaje de embarcaciones arribadas a puerto, las tecnologías de reducción de emisiones en barcos, el uso de tecnologías “Cold-ironing”, tecnologías para operaciones en puerto, entre otros. Lastimosamente, los informes finales no hacen mención de si se cuenta con este tipo de

tecnologías en puerto y mucho menos se da detalle de las mismas. Por lo que este análisis se escapa del alcance del presente proyecto.

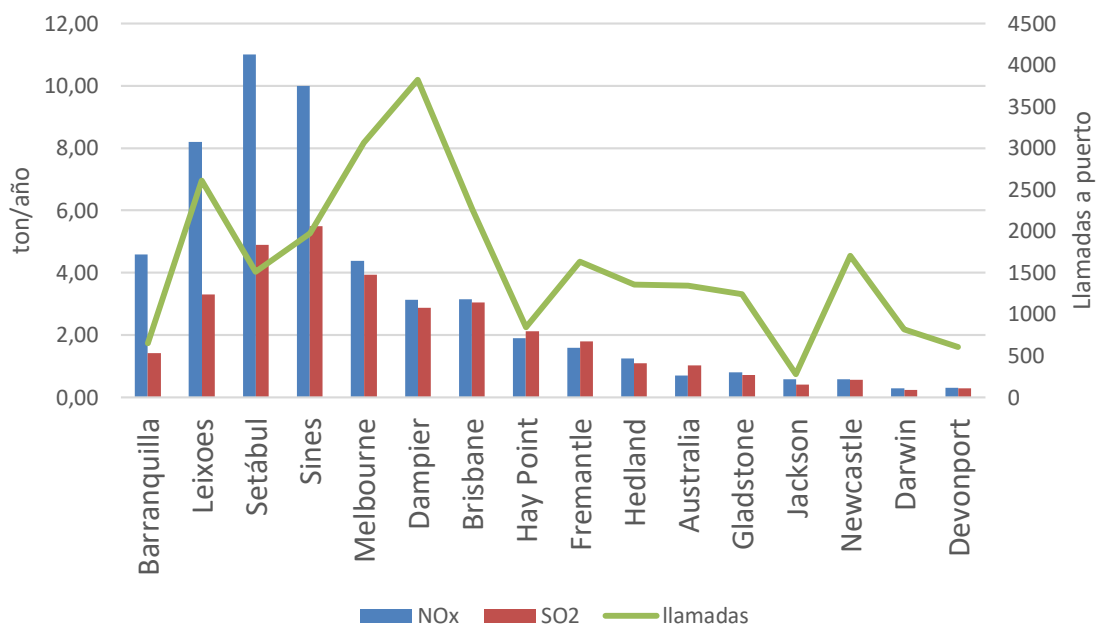


Figura 147. Emisiones de NO_x y SO_2 de los puertos estudiados en función de las llamadas a Puerto.

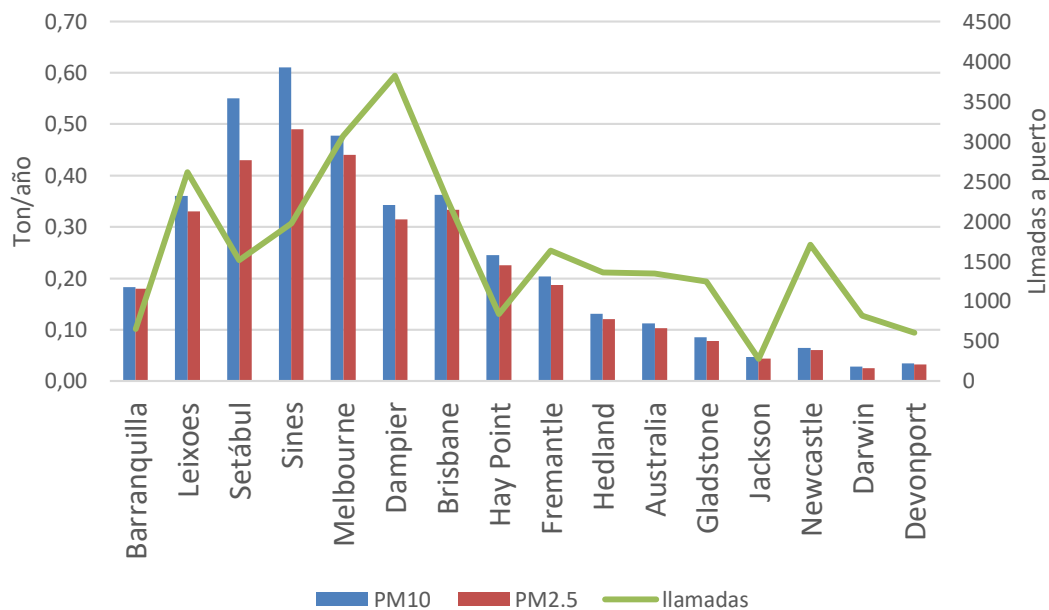


Figura 18. Emisiones de PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$ de los puertos estudiados en función de las llamadas a puerto.

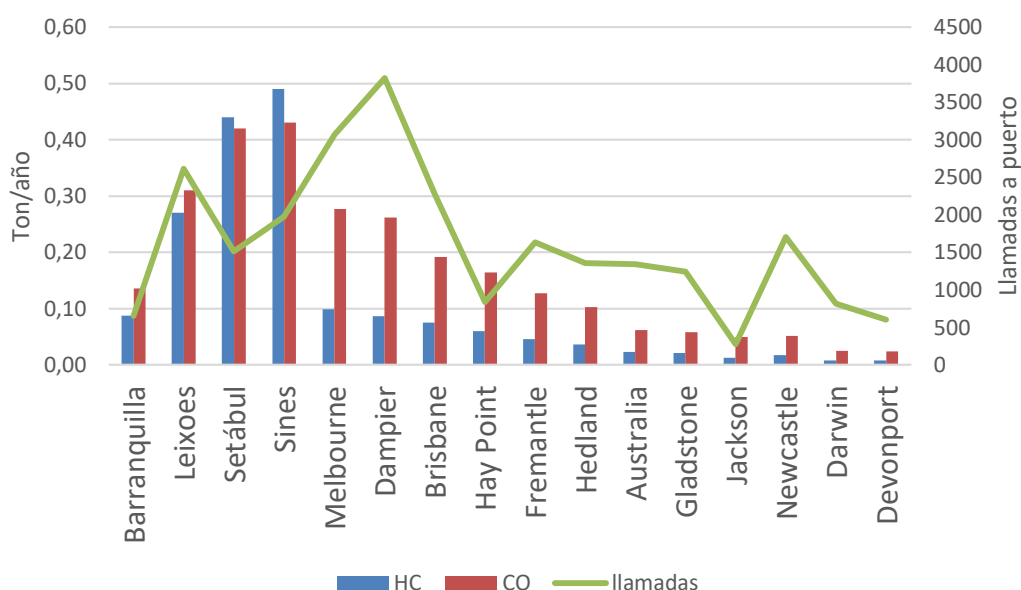


Figura 19. Emisiones de HC y CO de los puertos estudiados en función de las llamadas a puerto.

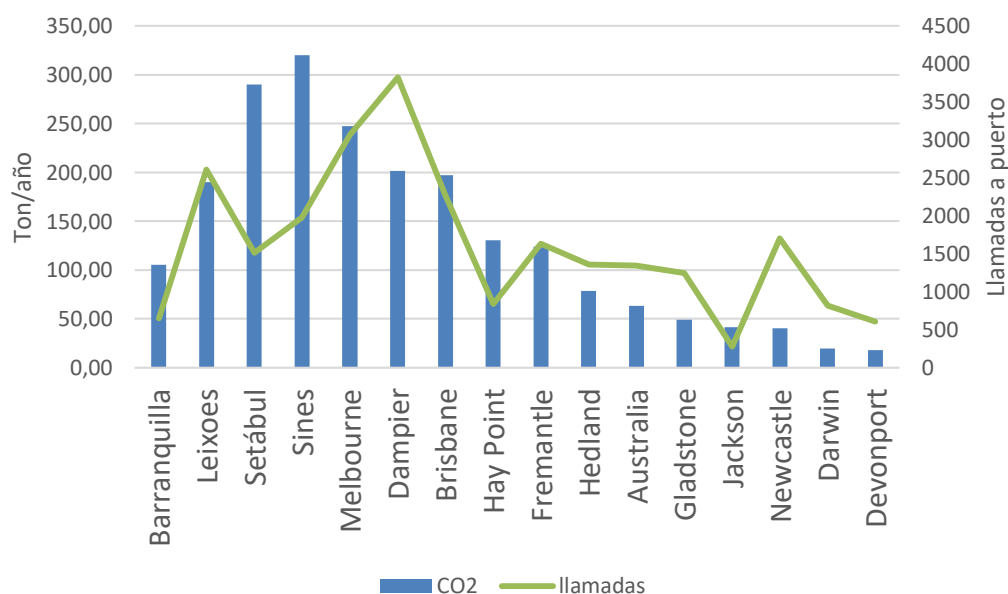


Figura 150. Emisiones de CO₂ de los puertos estudiados en función de las llamadas a puerto.

Sin embargo, si se puede afirmar que las emisiones del TMFB no son preocupantemente altas para los contaminantes estudiados si se le compara con los puertos de Leixoes, Setábul y Sines (Portugal), esto en función de la cantidad de llamadas a puerto y la proporción en emisiones que se tiene para con estos puertos. No obstante, es una situación que se puede mejorar de manera significativa si se realiza este mismo análisis con los puertos de

Australia. En general estos últimos presentan un tráfico alto de embarcaciones tipo granel (tipo altamente contaminante por tiempos en “Hotelling”), incluso mayor que el tipo container, por lo que se puede deducir que es los puertos cuentan con la tecnología y gestión adecuada para una operación mucho más efectiva, reduciendo así las emisiones totales.

9.3. Impactos potenciales:

En la tabla 12 se presenta un listado de los principales impactos ambientales que se pueden estar generando o que se generarán si no se toman las medidas de control pertinentes para la disminución de contaminantes atmosféricos presentados en la siguiente sección del presente documento.

Tabla 12. Impactos ambientales potenciales de no tomarse medidas de control.

Componente	Impacto	Descripción
Atmosféricos	Generación de Smog	La presencia simultánea de Hidrocarburos, Óxidos de Nitrógeno, rayos ultravioletas y la estratificación atmosférica conduce a la formación del smog fotoquímico, de consecuencias muy graves para la salud de los seres vivos.
	Cambios en la calidad del aire.	Debido principalmente por el aumento de las concentraciones de CO, SO ₂ , NO ₂ y material particulado, presentes en la atmósfera.
	Cambios en los niveles de ruido.	Si bien su análisis no se contempla en el presente estudio, es un impacto significativo derivado de las actividades en puerto.

		<p>Los Óxidos de Nitrógeno y Azufre, combinados con Hidrocarburos contenidos en el smog y con la humedad del aire producen Ácidos Nitroso y Sulfúrico, que posteriormente caen sobre la tierra en forma de lluvia ácida y contaminan grandes áreas, algunas veces situadas a cientos de kilómetros del lugar de origen de la contaminación.</p>
	Generación de lluvia ácida	
		<p>Producto de las grandes cantidades de gases de efecto invernadero generados. Si bien es inevitable la emisión de estos gases (a menos que se opte por tecnologías verdes en su totalidad), una mala gestión energética, así como el uso de combustibles de mala calidad implica una mayor emisión de estos gases por unidad de combustible consumido.</p>
	Calentamiento global	
		<p>Potencial afectación de los alrededores por malos olores producto de la quema de combustible de mala calidad en caso de una mala dispersión de los contaminantes.</p>
	Olor	
		<p>Irritación de los ojos y mucosas</p>
		<p>Aumento de casos de la tos y molestias en el pecho en poblaciones vecinas.</p>
		<p>Agravamiento de enfermedades existentes, así como la degradación del estado de salud el cual hace a las personas más susceptibles a otras infecciones o el desarrollo de enfermedades crónicas del tipo respiratorias o cardiovasculares.</p>
Socioeconómico y cultural	Salud Pública	

Aumento del riesgo de padecer enfermedades respiratorias agudas, como la neumonía, y crónicas, como el cáncer del pulmón y las enfermedades cardiovasculares. De los contaminantes estudiado es el material particulado el que representa un mayor peligro para la salud pública.

Aumento de la mortalidad a largo plazo.

Deterioro de metales, textiles, cuero, acabados, revestimientos, entre otros materiales.

Mayor deterioro de los motores principales, auxiliares y calderas producto de una mala gestión energética y uso de combustibles de mala calidad.

La ausencia de una buena gestión energética además de implicar mayores niveles de emisión de contaminantes, también se traduce en un mayor consumo de energía y por ende un mayor gasto a mediano y largo plazo.

Altos costos intrínsecos en las externalidades no consideradas hasta de las emisiones atmosféricas.

Requerimiento de una mayor inversión en el sistema de salud pública.

Cambio en el valor del suelo en función del arrastre de contaminante y dispersión de los mismos.

Dimensión económica

Cambio en la dinámica sociocultural en respuesta de la afectación a la salud pública generada por la calidad del aire.

Cultural

		Bajo estatus de sostenibilidad, por lo que no se tiene un aporte significativo en el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible.
	Social	
		Para dar cumplimiento a la Resolución No. 2254 de 2017, se deben tomar medidas de gestión para la mejora de la calidad del aire. Siendo el puerto una fuente importante de emisiones sin el reconocimiento que se debe, puede derivar en toma de medidas de gestión inadecuadas para combatir la contaminación atmosférica.
	Políticas	Debido principalmente por las precipitaciones de lluvia ácida, así como el asentamiento del material particulado que producen alteraciones en los parámetros fisicoquímicos y biológicos del agua superficial.
Agua superficial	Cambios en la calidad del agua superficial	
		Debido principalmente por las precipitaciones de lluvia ácida, así como el asentamiento del material particulado que producen alteraciones en los parámetros fisicoquímicos y biológicos del suelo.
	Cambios en la calidad de los suelos	A causa de la acidificación de la capa orgánica que pueden derivar en afectación en la capacidad productiva del suelo
Suelo	Clasificación agrológica y cambio en el uso del suelo	
		Modificación en la cobertura vegetal del herbácea en la región. Afectación al sistema de mangles y demás sistemas estuarios de la región, principalmente en Isla Salamanca.
	Flora	
Biótico	Fauna	Modificación de hábitats terrestres y corredores biológicos

		Modificación de hábitats acuáticos y corredores biológicos.
		Deterioro de la calidad paisajística a causa de pluma de contaminantes y smog fotoquímico.
		Perdida de visibilidad producto del smog fotoquímico o la mala dispersión de las plumas de contaminantes.
Paisaje	Afectación paisajística	Cambios en el paisaje por perdida de cobertura vegetal.

9.4. Medidas de gestión para el control de la contaminación atmosférica en el puerto

Con el fin de cumplir con el último objetivo específico se recomiendan las siguientes medidas

Implementación de tecnologías Cold-ironing: Consiste en el desarrollo de conexiones eléctricas de los buques mientras estén en puerto, de esta manera se reduce la quema de combustibles de baja calidad como BFO. Para este se recomienda:

- I. Incentivar actividades de investigación y desarrollo que aborden sistemas Cold-ironing.
- II. Realizar estudios costo-beneficio que involucren las conexiones en puerto con la disminución en emisiones, costos y mitigación de impactos ambientales.
- III. Alentar la implementación de sistemas Cold-ironing en función de sus costos de abatimiento.

Buena gestión de operaciones en puerto: Consiste en la mejora significativa en las operaciones en puerto (cargue, descargue, requerimientos y/o permisos de entra y salida a puerto, entre otros) tal que se disminuyan o eliminen los desperdicios (actividades que ralenticen las operaciones sin aporte significativo) y de esta manera disminución notable en los tiempos de “Hotelling”. En esta se contemplan las siguientes medidas:

- I. Identificación y análisis de cuellos de botella en proceso.
- II. Establecer un programa de mejora continua de las operaciones en puerto, tal que se aumente la capacidad del mismo.
- III. Desarrollo de un mecanismo de retroalimentación que permita recopilar y compartir las lecciones aprendidas sobre la implementación de medidas a través de un posible intercambio de información de mejores prácticas.
- IV. Actualización de los programas de gestión.
- V. Automatización de operaciones.

Cambio en combustibles: En miras al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible y el Anexo VI, se debe hacer uso de combustibles con un menor contenido en azufre y mayor calidad en general. Para esto, se debería considerar:

- I. Iniciar actividades de investigación y desarrollo que aborden los sistemas de propulsión marina, combustibles alternativos de bajo carbono y cero carbono, así como otras fuentes de energías más amigables con el ambiente aplicables en el sector.
- II. Incentivos para las embarcaciones que usen combustibles de mejor calidad, así como energías verdes.
- III. Incentivar actividades de investigación y desarrollo que aborden nuevos combustibles y biocombustibles.
- IV. Exigir certificación del combustible utilizado.
- V. Posible uso de barcos eléctricos.

Actualización en tecnologías de Operación: En la misma línea de lo planteado para la mejora en la gestión de las operaciones en puerto, la actualización de las tecnologías para el manejo de mercancías disminuiría de manera significativa en los tiempos de “Hotelling”. En este se puede considerar las siguientes medidas:

- I. Establecimiento de un programa de actualización de equipos.

- II. Realizar estudios económicos que involucre costos asociados a la actualización de equipos y mejoras en operación.

Tecnologías de limpieza de gases: Consiste en la implementación de sistema de lavadores de gases, Scrubbers, filtros, entre otros, de manera, que se puedan disminuir las emisiones generadas al medio, especialmente las de material particulado. Para este punto en específico se recomienda:

- I. Fomentar y facilitar la adopción general de mecanismos de reducción de emisiones.
- II. Incentivar el uso de mecanismos nuevos e innovadores de reducción de emisiones.
- III. Alentar el desarrollo e investigación de tecnologías de limpieza de gases en embarcaciones.
- IV. Medición en puerto y embarcaciones de contaminantes a disminuir con estas tecnologías.

Gestión del Uso Eficiente de la Energía: Abarca las diferentes estrategias en las embarcaciones para disminuir los requerimientos energéticos de la misma. En este punto se consideran las siguientes medidas:

- I. El desarrollo de un Marco de eficiencia energética, en donde se recomienda que estén en función de los índices de eficiencia energéticas de MARPOL (RESOLUTION MEPC.304(72), 2018).
- II. Establecimiento de un programa de mejora para la flota existente.
- III. Considerar y analizar la optimización de la velocidad como una medida de eficiencia energética, es decir, el aumento y disminución de la misma teniendo en cuenta los problemas de seguridad, distancia recorrida, el mercado o comercio y que dicha medida no afecte la capacidad del envío para atender los diferentes llamados a puerto.
- IV. Considerar y analizar medidas para abordar las emisiones de metano y mejorar aún más las medidas para abordar las emisiones de compuestos orgánicos volátiles
- V. Alentar el desarrollo de los planes de acción nacionales para desarrollar políticas y estrategias de uso eficiente de la energía para abordar las emisiones de contaminantes del transporte marítimo internacional.

- VI. Iniciar actividades de investigación y desarrollo que aborden los sistemas de propulsión marina, combustibles alternativos de bajo carbono, y tecnologías innovadoras para mejorar aún más la eficiencia energética.
- VII. Incentivos para los primeros en desarrollar y adoptar nuevas tecnologías para el uso eficiente de la energía.
- VIII. Desarrollar guías robustas de los ciclos de vidas para los diferentes combustibles.
- IX. Incentivar la actualización de equipos en los buques (refrigeración, auxiliares, electrodomésticos, iluminación).
- X. Mantenimiento preventivo en equipos de propulsión y auxiliares.

Dragado continuo en Rio Magdalena: Tanto el TMFB como los diferentes puertos que se encuentran en la desembocadura del río Magdalena, aún están muy lejos de una solución definitiva en el tema de sedimentos y pérdida de profundidad en el rio Magdalena. Se está a la espera del Gobierno nacional y Cormagdalena para poder conseguir un dragado estable y continuo durante todo el año, y no solo dragados puntuales por emergencias. Por esto, se recomiendan dragados continuos de al menos 10 metros para toda la trayectoria de maniobra, garantizando que las embarcaciones no deban reducir demasiado la velocidad durante esta fase, con la finalidad que los factores de carga no caigan por debajo del 20% y evitar así mayores emisiones en general.

Ratificación de Anexo VI (MARPOL): El Estado colombiano por medio de la Ley 12 de 1981 dio paso a la creación de Dirección General Marítima (DIMAR) para el cumplimiento de las normas MARPOL para la protección de los océanos en el territorio nacional. No obstante, solo se ratificaron los primeros 5 anexos, quedando el Anexo VI, relativo a la contaminación atmosférica por los buques (introducido al tratado mediante el protocolo de 1997), pendiente de ratificar por el gobierno.

Con la ratificación de este anexo, se daría paso a una serie de normas en general que permitirían dar cumplimiento y seguimiento a esta problemática. A su vez, se les exigiría a las diferentes entidades participantes en el sector, la adopción de las medidas. Sin embargo, debido a que el efectuar la totalidad de estas medidas resulta inviable desde el

punto de vista meramente económico, es obligación del Estado Colombiano realizar un estudio de las condiciones y características de la flota y puertos actuales, tal que se tomen las medidas adecuadas (una normativa progresiva, estímulos beneficios económicos, entre otros). En general se recomienda:

- I. Ratificación de Anexo VI por parte del Gobierno colombiano.
- II. Estudio y análisis detallado del sector.
- III. Promulgación de nueva legislación que de paso al cumplimiento continuo y sostenido de las nuevas metas y normas de MARPOL adquiridas.

Inspección de Buques: Estas actividades tendrán como finalidad, determinar que los buques (elementos, materiales o equipos, su tripulación, su carga y sus procedimientos operativos) reúnan las prescripciones y condiciones aplicables de la normativa prevención de la contaminación del medio ambiente marino (Convenio MARPOL: Anexo 6). Así como garantizar que se dé uso a los combustibles asignados.

Para el caso particular del TMFB, las actividades inspectoras abarcarían solo la etapa durante la cual el buque presta su servicio (Sin mayores consideraciones para las etapas previas, construcción de la motonave y desguace de la misma).

La organización y ordenación de las actividades de inspección deberían ser llevadas a cabo por la DIMAR, por la naturaleza de la misma. Entre otras obligaciones como:

- I. Realizar todas las actividades inspectoras necesarias para llegar al convencimiento razonable de que los elementos objeto cumplen con lo presentado en el presente proyecto (Medidas de gestión y/o recomendaciones), así como las demás medidas expuestas en el convenio MARPOL.
- II. Elaborar los correspondientes informes de inspección de conformidad para cada uno de las embarcaciones que arriben en el puerto.
- III. Expedir los certificados que correspondan de acuerdo con las futuras normativas una vez el Estado colombiano ratifique el Anexo 6 de MARPOL.

Con respecto al procedimiento sancionador, la clasificación de infracciones, así como el tipo de infracciones o medidas se escapan del alcance del presente proyecto.

10. Conclusiones

- Las emisiones totales generadas para el escenario presentado en el puerto de Barranquilla en el año 2018 fueron: 4583,18 ton de NO_x, 1417,34 ton de SO₂, 182,52 ton de PM₁₀, 179,42 ton de PM_{2,5}, 87,10 ton de HC, 155,84 ton de MNVOC, 136, 19 ton de CO, 105 677,85 ton de CO₂, 0,77 ton de CH₄ y 4,95 ton de N₂O. Siendo los NO_x los de mayor emisión para contaminantes primarios y CO₂ para los secundarios y/o gases de efecto invernadero.
- De acuerdo al tipo de embarcación, las mayores emisiones totales fueron generadas por el tipo container, exceptuando las emisiones de NO_x, HC, MNVOC, CH₄ y N₂O, que fueron mayores para el tipo granel, con diferencias de 792,24 ton, 1,42 ton y 1,82 ton, 0,08 ton y 0,01 ton, respectivamente. Lo anterior llama la atención, por el hecho de representar solo el 22% de las embarcaciones estudiadas frente al 61% que corresponden a tipo container. Probablemente, los tiempos mayores de permanencia en puerto pueden ocasionar las mayores emisiones de NO_x, a pesar de representar solamente 1/3 del número total del tipo container.
- La actividad o fase en la que se generaron mayores emisiones en el puerto de estudio, correspondió a “Cruising”, excepto para los contaminantes NO_x y MNVOC, que fueron las mayores emisiones provenientes de “Hotelling”.
- Para el presente estudio se puede afirmar que los motores auxiliares contribuyeron más en las emisiones de la mayoría de los contaminantes estudiados, posiblemente porque para tiempos prolongados de “Hotelling” (donde se asume que no opera el motor principal), el motor auxiliar es el encargado de suministrar la energía para llevar a cabo las diferentes operaciones dentro del puerto, siendo la principal fuente de emisión de contaminantes. Tal fue el caso de NO_x y MNVOC.
- Pese a las limitaciones identificadas al momento de realizar la comparación entre puertos, de acuerdo con los resultados obtenidos podemos inferir que actualmente para el periodo de estudio la situación del TMFB no es crítica en comparación con otros puertos del mundo en lo que respecta a emisiones atmosféricas, aunque hay puertos con menor concentración de contaminantes atmosféricos. No obstante, esta

situación puede empeorar si no se realizan medidas de prevención y mejoras, por lo que se requieren mayores estudios que permitan mejorar dicha situación. Además, el puerto ampliará su operación en el momento de la entrega del nuevo puente Pumarejo. En ese caso, se debe actualizar el presente estudio con el fin de conocer la situación final luego de la puesta en marcha del nuevo puente.

- Para la disminución de las emisiones atmosféricas producto de las embarcaciones estudiadas el gobierno colombiano debe ratificar el Anexo VI, tal que se estimule la implementación de medidas de gestión para la disminución de emisiones y mitigación de impactos.

11. Recomendaciones

- Realizar más estudios de campo en el TMFB, para obtener mayor detalle en la información a modelar para la estimación de emisiones y análisis de los mismos. Los estudios deben enfocarse en determinar los factores de emisión reales medidos directamente en la motonave, además de conocer la información en detalle de los combustibles utilizados y calidad de los mismos, tecnologías y gestión de operaciones en puerto, entre otros.
- Considerar las diferentes variables meteorológicas actualmente medidas en el puerto.
- Incorporar la totalidad de embarcaciones en función de las fichas técnicas más detalladas de los mismos, así como considerar el destino de cada llamado para la disminución de posibles errores.
- Hacer estudios isocinéticos en una muestra significativa de las embarcaciones arribadas a puerto para la evaluación del modelo.
- Ampliar el estudio de estimación de emisiones para periodos de tiempo más largos, tal que se pueda analizar de mejor manera el comportamiento de las emisiones con respecto a las llamadas a puerto y otros parámetros o fenómenos.
- Desarrollar modelos estadísticos para el análisis de un mayor número de parámetros, así como modelos predictivos.
- Extender la estimación a mas puertos, de manera que se pueda realizar una comparación mucho más acertada de los mismos.
- Realizar mediciones y monitoreo continuo de la calidad del aire, con el fin de conocer las concentraciones reales de contaminantes en áreas circundantes y la influencia de los mismos.
- Determinación y evaluación de impactos ambientales producto de la actividad en puerto para una mejor estimación de la situación actual del puerto en materia de emisiones atmosféricas.

- Considerar otras fuentes de emisión, producto de la actividad marítima, como la resuspensión del material a granel y las operaciones de otras embarcaciones como remolcadores, barcazas, lanchas, entre otros.
- Realizar estudios de viabilidad (costo beneficio) para la implementación de las alternativas planteadas, con el fin de establecer recomendaciones mucho más acertadas.

12. Bibliografía

- Alcaldia Distrital de Barranquilla - Alex Char. (s. f.). Recuperado 19 de noviembre de 2018, de <http://www.barranquilla.gov.co/>
- Alver, F., Ayhan, B., & Alver, Ü. (2018). Estimating of shipping emissions in the Samsun Port from 2010 to 2015. *Atmospheric Pollution Research*, (November 2017). <https://doi.org/10.1016/j.apr.2018.02.003>
- An, I., Vladimir, N., & Cho, D. (2018). Determining environmental pollution from ships using Index of Energy Efficiency and Environmental Eligibility (I4E), 95(March), 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2018.06.019>
- Ballini, F., & Bozzo, R. (2015). Air pollution from ships in ports : The socio-economic benefit of cold-ironing technology. *Research in Transportation Business & Management*, 17, 92–98. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2015.10.007>
- Baumgardner, D., Pozo, D., Calvo, A., Castro, A., Fraile, R., Ana, M. C., & Sorribas, M. (2017). Properties of particulate pollution in the port city of Valparaíso , Chile, 171. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.09.044>
- Carpenter, A., Lozano, R., Sammalisto, K., & Astner, L. (2018). Securing a port ' s future through Circular Economy : Experiences from the Port of Gävle in contributing to sustainability. *Marine Pollution Bulletin*, 128(January), 539–547. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.01.065>
- Chatzinikolaou, S. D., Oikonomou, S. D., & Ventikos, N. P. (2015). Health externalities of ship air pollution at port – Piraeus port case study. *Transportation Research Part D*, 40, 155–165. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.08.010>
- Chen, D., Zhao, Y., Nelson, P., Li, Y., & Wang, X. (2016). Estimating ship emissions based on AIS data for port of Tianjin , China. *Atmospheric Environment*, 145, 10–18. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.086>
- Chengpeng, W., Di, Z., Xinping, Y., & Zaili, Y. (2017). A novel model for the quantitative evaluation of green port development – A case study of major ports in China. *Transportation Research Part D*. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.06.021>

- Coello, J., Williams, I., Hudson, D. A., & Kemp, S. (2015). An AIS-based approach to calculate atmospheric emissions from the UK fishing fleet. *Atmospheric Environment*, 114, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.011>
- Cui, H., & Notteboom, T. (2017). Modelling emission control taxes in port areas and port privatization levels in port competition and co-operation sub- games. *Transportation Research Part D*, 56(August), 110–128. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.07.030>
- Deniz, C., & Kilic, A. (2010). Estimation and Assessment of Shipping Emissions in the Region of Ambarlı Port , Turkey, 29(1), 107–115. <https://doi.org/10.1002/ep>
- Deniz, C., Kilic, A., & Cıvkaroglu, G. (2010). Estimation of shipping emissions in Candarli Gulf , Turkey, (December 2009), 219–228. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1273-2>
- EMEP/EEA, Agencia Europea de Medio Ambiente (2016). air pollutant emission inventory guidebook. 2016
- Entec. (2010). *Defra UK Ship Emissions Inventory*.
- Fan, Q., Zhang, Y., Ma, W., Ma, H., Feng, J., Yu, Q., ... Chen, L. (2016). Spatial and Seasonal Dynamics of Ship Emissions over the Yangtze River Delta and East China Sea and Their Potential Environmental Influence. *Environmental Science and Technology*, 50(3), 1322–1329. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b03965>
- Goldsworthy, L., & Goldsworthy, B. (2015). Environmental Modelling & Software Modelling of ship engine exhaust emissions in ports and extensive coastal waters based on terrestrial AIS data e An Australian case study. *Environmental Modelling and Software*, 63, 45–60. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.009>
- Joseph, J., & Gupta, R. S. P. S. K. (2009). Estimation of air pollutant emission loads from construction and operational activities of a port and harbour in Mumbai , India, 85–98. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0614-x>
- Kilic, A. (2010). Inventory of Shipping Emissions in Izmit Gulf , Turkey, 29(2). <https://doi.org/10.1002/ep>
- L, H. S., Deniz, C., & Alper, K. J. J. (2013). An Investigation on the Effects of Ship Sourced Emissions in Izmir Port , Turkey. *The Scientific World Journal*, 2013.
- Maragkogianni, A., & Papaefthimiou, S. (2015). Evaluating the social cost of cruise ships

- air emissions in major ports of Greece, 36, 10–17.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.02.014>
- Moore, T. J., Redfern, J. V, Carver, M., Hastings, S., Adams, D., & Silber, G. K. (2018). Exploring ship traffic variability off California, 163(March), 515–527.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.03.010>
- Moreno-gutiérrez, J., Pájaro-velázquez, E., Amado-sánchez, Y., Rodríguez-moreno, R., Calderay-cayetano, F., & Durán-gradós, V. (2019). Comparative analysis between different methods for calculating on-board ship ' s emissions and energy consumption based on operational data. *Science of the Total Environment*, 650, 575–584. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.045>
- Ng, S. K. W., Loh, C., Lin, C., Booth, V., Chan, J. W. M., Yip, A. C. K., ... Lau, A. K. H. (2013). Policy change driven by an AIS-assisted marine emission inventory in Hong Kong and the Pearl River Delta, 76, 102–112.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.07.070>
- Nunes, R. A. O., Martins, F. G., & Sousa, S. I. V. (2017a). Assessment of shipping emissions on four ports of Portugal *. *Environmental Pollution*, 231, 1370–1379.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.08.112>
- Nunes, R. A. O., Martins, F. G., & Sousa, S. I. V. (2017b). The activity-based methodology to assess ship emissions - A review *. *Environmental Pollution*, 231(x), 87–103. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.07.099>
- Papaefthimiou, S., Maragkogianni, A., & Andriosopoulos, K. (2016). Evaluation of cruise ships emissions in the Mediterranean basin : The case of Greek ports, 8318(June). <https://doi.org/10.1080/15568318.2016.1185484>
- Port, Q., Chen, D., Wang, X., Nelson, P., Li, Y., Zhao, N., ... Guo, X. (2017). Ship emission inventory and its impact on the PM 2 . 5 air pollution in. *Atmospheric Environment*, 166, 351–361. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.021>
- Quality Bunkers Supply (2018). Solicitud de autorizaciones para el suministro de combustibles.
- Reilly, K. O. (2005). *Port of Los Angeles Inventory of air emissions*.
- Sanabra, M. C., José, J., Santamaría, U., & Xavier, F. (2014). Manoeuvring and hotelling

- external costs : enough for alternative energy sources ? *Maritime Policy & Management*, 41(1), 42–60. <https://doi.org/10.1080/03088839.2013.782441>
- Saxe, H., & Larsen, T. (2004). ARTICLE IN PRESS Air pollution from ships in three Danish ports. *Atmospheric Environment*, 38, 4057–4067. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.03.055>
- Song, Sang-keun, & Shon, Z. (2014). Current and future emission estimates of exhaust gases and particles from shipping at the largest port in Korea. <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2569-5>
- Song, Su. (2014). Ship emissions inventory , social cost and eco-efficiency in Shanghai Yangshan port, 82(x), 288–297. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.006>
- Steffens, J., Postdoctoral, E., Kimbrough, S., Baldauf, R., Isakov, V., Brown, R., ... Deshmukh, P. (2017). Near-port air quality assessment utilizing a mobile measurement approach. *Atmospheric Pollution Research*, 8(6), 1023–1030. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.04.003>
- Styhre, L., Winnes, H., Black, J., Lee, J., & Le-griffin, H. (2017). Greenhouse gas emissions from ships in ports – Case studies in four continents. *Transportation Research Part D*, 54, 212–224. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.04.033>
- Taylor, P., Cullinane, K., Tseng, P., & Wilmsmeier, G. (2015). International Journal of Sustainable Transportation The Estimation of Container Ship Emissions at Berth in Taiwan. *International Journal of Sustainable Transportation*, (February 2015), 37–41. <https://doi.org/10.1080/15568318.2014.975303>
- Tichavska, M., & Tovar, B. (2015). Port-city exhaust emission model : An application to cruise and ferry operations in Las Palmas Port, 78, 347–360. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.05.021>
- Tovar, B., Gritsenko, D., & Johansson, L. (2017). Air emissions from ships in port : Does regulation make a difference ? *Transport Policy*, (February). <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.03.003>
- Trozzi, C. (2010). Emission estimate methodology for maritime navigation. In *US EPA 19th International Emissions Inventory Conference, San Antonio, Texas*.
- Villalba, G., & Demisse, E. (2011). Estimating GHG emissions of marine ports — the

case of Barcelona. *Energy Policy*, 39(3), 1363–1368.

<https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.12.008>

Wang, C., & Chen, J. (2017). Computers & Industrial Engineering Strategies of refueling , sailing speed and ship deployment of containerships in the low-carbon background. *Computers & Industrial Engineering*, 114(October), 142–150.

<https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.10.012>

Yang, D. (2007). An Emission Inventory of Marine Vessels in Shanghai in 2003.

Environmental Science & Technology, 41(15).

Yau, P. S., Lee, S. C., Corbett, J. J., Wang, C., Cheng, Y., & Ho, K. F. (2012). Estimation of exhaust emission from ocean-going vessels in Hong Kong ☆. *Science of the Total Environment*, 431, 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.092>

Zhang, Y., Yang, X., Brown, R., Yang, L., Morawska, L., & Ristovski, Z. (2017). Science of the Total Environment Shipping emissions and their impacts on air quality in China. *Science of the Total Environment*, 581–582, 186–198.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.12.098>

Zhao, M., Zhang, Y., Ma, W., Fu, Q., Yang, X., Li, C., .Chen, L. (2013). Characteristics and ship traffic source identification of air pollutants in China’s largest port.

Atmospheric Environment, 64, 277-286.

<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.007>